



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ENERGETICKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
ENERGY INSTITUTE

OPTIMALIZACE MIKROKLIMATU V KABINÁCH MALÝCH DOPRAVNÍCH LETADEL

OPTIMIZATION OF CABIN ENVIRONMENT IN SMALL TRANSPORT AIRCRAFTS

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Ing. JAN FIŠER

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MIROSLAV JÍCHA, CSc.

BRNO 2011

Abstrakt

Disertační práce se zabývá návrhem a optimalizací prostředí v kabinách malých dopravních letadel a to zejména z hlediska tepelné pohody prostředí a kvality větrání. Byly optimalizovány části distribučních systémů vzduchu a konstrukční opatření, která na základě rešerše problematiky a zkušeností autora mohou mít největší vliv na tepelnou pohodu a kvalitu větrání. Zvolené úpravy a jejich vliv na vnitřní mikroklima kabiny byly vyšetřovány pomocí CFD modelu, který byl nejprve validován pomocí výsledků získaných z měření proudových a teplotních polí v maketě kabiny malého dopravního letadla EV-55. Byly vyšetřovány: Optimalizace typu distribuce větracího vzduchu, Optimalizace geometrie distribučních vzduchovodů, Optimalizace tloušťky tepelné izolace a Optimalizace emisivity vnitřních povrchů. Tepelná pohoda byla posuzována na základě metodiky ekvivalentní teploty a diagramu komfortních zón vyvinutých H. O. Nilssonem. Pro posouzení kvality větrání byl použit koncept založený na simulaci indexu stáří vzduchu. Celkem bylo simulováno 50 modelových případů a na základě jejich výsledků byl jako optimální vyhodnocen systém Modifikovaného směšovacího větrání s geometrií vzduchovodů navrženou autorem práce. V kombinaci s vysokým zateplením stěn a vysokou emisivitou interiéru, pak tento systém větrání zajišťuje nejvyšší tepelný komfort a kvalitu větrání pro zkoumaný rozsah okolních a provozních podmínek.

Klíčová slova

Prostředí v kabinách letadel, Tepelná pohoda, Modely tepelné pohody, Systémy pro klimatizaci kabiny, Distribuce vzduchu, Optimalizace prostředí

Abstract

The thesis deals with design and optimization of environment in cabins of small transport aircrafts, especially in terms of thermal comfort and quality of ventilation. The design of air distribution systems and structural design were optimized and most important parts of cabin design with highest impact on the quality of thermal comfort and ventilation were identified based on literature research and experience of the author. The chosen modifications and their influence on the microclimate inside the cabin were investigated using the CFD model, which was validated by results obtained from measurements of flow and temperature fields in the cabin mock-up of small transport aircraft EV-55. Next optimizations were investigated: The type of air distribution system, The geometry of ducts of air distribution system, Thickness of thermal insulation and Emissivity of internal surfaces. Thermal comfort was assessed based on the methodology of the equivalent temperature and comfort zones diagram developed by H. O. Nilsson and for assessing the quality of ventilation the concept of based on index of the age of the air was used. Fifty cases were simulated in total and base of its results Modified mixing ventilation with original air ducts geometry have been evaluated as an optimum. The ducts geometry of Modified mixing ventilation system was suggested by author specially for the thesis. In combination with high thermal insulation of walls and high emissivity of the interior, then this system of ventilation ensures maximum thermal comfort and quality of ventilation for the investigated range of environmental and operational conditions.

Key words

Cabin environment, Thermal comfort, Models of thermal comfort, Environmental control system, Air distribution, Environment optimization

Bibliografické citace

FIŠER, Jan. *Optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravních letadel*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav, Odbor termomechaniky a techniky prostředí, 2011. 162 s. 7 příloh, Disertační práce. Vedoucí práce prof. Ing. MIROSLAV JÍCHA, CSc.

Čestné prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci na téma *Optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravních letadel* vypracoval samostatně pod vedením prof. Ing. MIROSLAVA JÍCHY, CSc.. Veškeré použité zdroje informací, obrázků a dat jsem uvedl v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 22. srpna 2011

Ing. Jan Fišer

Poděkování

Na tomto místě bych rád poděkoval lidem, kteří se podíleli na vzniku této práce ať již přímo prostřednictvím rad a pomoci, či nepřímo osobní podporou autora. Na prvním místě patří velký dík autorově rodině, rodičům a především pak manželce Lucii.

Práce by nikdy nevznikla bez manažerského a odborného vedení školitele prof. Ing. Miroslava Jíchy, CSc. Svým tolerantním vedením a zapojením autora do nejrůznějších projektů týkajících se větrání a klimatizace kabin dopravních prostředků (CLKV, iSPACE, spolupráce s firmou Volkswagen) umožnil vznik této práce, rozvoj dovedností a znalostí autora.

Část práce věnující se měření a validaci modelu by jen obtížně vznikla nebýt vydatné pomoci, podpory a hlavně odborných rad kolegů Jiřího Hejčíka, Jana Košnera a Jana Otáhalu. Při transportu makety a její instalaci také významně pomohly Karel Galandr, Jaroslav Volavý a Stanislav Knotek. Velký a významný dík také patří Davidu Nastoupilovi z firmy Evektor spol. s r.o., díky jehož aktivitě a pomoci bylo možné zdarma získat designérskou maketu kabiny letadla EV-55 pro výzkumné účely. Významnou měrou také napomohl autorovi k osvětlení problematiky větrání a vytápění kabin malých dopravních letadel.

Odbornými radami a důležitými postřehy v oblasti CFD simulací a vytváření modelů přispěli také Matěj Forman, Vladimír Krejčí a Jaroslav Katolický. S matematickými problémy a dotazy autora pak uměli vždy velice rychle a elegantně poradit kolegové z kanceláře Jaroslav Volavý a Stanislav Knotek. Posledně jmenovaní také museli nejednou snášet autorovi cholerické výlevy, když výpočetní technika či síťová infrastruktura "stávkovaly". Za to se jim tímto autor omlouvá a děkuje jim za jejich tolerantnost.

V neposlední řadě by autor rád poděkoval osobám, které se vytváření práce přímo nezúčastnily, ale poskytly svým příkladem důležité inspirace. Při psaní textu práce si autor nejednou vzpomněl na větu Jana Fišera staršího "Každý den se musí chtít.", při změnách verzí výpočetního software, kdy se měnily některé funkcionality a modely přestávaly fungovat si vždy vzpomněl na úsloví Theodora Barneta, které říká "Když něco funguje tak se do toho nemá rýpat." a když pak opakovaně nacházel neshody ve výsledcích měření a simulací způsobených nestabilitou primárních proudů vždy si vzpomněl na větu Richarda Philipse Feynmana říkající: "Turbulence je jedním z nejdůležitějších jevů, které zatím klasická fyzika uspokojivě nevysvětlila."

OBSAH

1	ÚVOD	10
2	VYMEZENÍ CÍLŮ A LIMITŮ PRÁCE	12
3	ZVOLENÝ POSTUP ŘEŠENÍ	13
4	MIKROKLIMA, MATABOLIZMUS ČLOVĚKA A TEPELNÁ POHODA.....	14
4.1	Parametry pro popis stavu vnitřního mikroklimatu	15
4.2	Tepelná pohoda/tepelný komfort	16
4.3	Fyziologie a metabolismus člověka.....	17
4.4	Čistota vzduchu	19
4.5	Indexy kvality větrání	20
5	MODELY FYZIOLOGIE A TEPELNÉHO KOMFORTU ČLOVĚKA	22
5.1	Modely lidské fyziologie - přehled	22
5.2	Modely tepelné pohody - přehled	24
5.3	Indexy tepelné pohody	26
5.4	Index obtěžování průvanem	28
5.5	Nilssonův model/Diagram komfortních zón	29
6	VĚTRÁNÍ KABIN LETADEL	33
6.1	Sledované škodliviny	33
6.2	Požadavky na větrání kabin letadel dle FAR 23.831, 25.831 a ASHRAE 161-2007 ..	36
6.3	Způsoby distribuce větracího vzduchu	37
6.3.1	<i>Celkové větrání (Mixing ventilation)</i>	<i>37</i>
6.3.2	<i>Zaplavovací větrání (Displacement ventilation).....</i>	<i>38</i>
6.3.3	<i>Lokální větrání (Personalized ventilation)</i>	<i>39</i>
6.3.4	<i>Síť distribučních vzduchovodů</i>	<i>41</i>
6.3.5	<i>Profily vzduchovodů</i>	<i>41</i>
6.4	Koncové prvky	42
6.4.1	<i>Hlavní výustky.....</i>	<i>43</i>
6.4.2	<i>Doplňkové výustky.....</i>	<i>43</i>
7	CFD A JEJÍ VYUŽITÍ PRO SIMULACE PROSTŘEDÍ V KABINÁCH	44
7.1	Využití CFD pro simulaci parametrů vnitřního prostředí.....	44
7.2	Modelování turbulence.....	48
7.3	Modelování přenosu tepla konvekcí a radiací	49

7.4	Modelování kvality větrání a vlhkosti.....	50
7.5	Postupy a metodiky pro tvorbu CFD modelů v software Star-CCM+	51
7.5.1	<i>Vliv kvality vstupní geometrie a výpočtové sítě buněk</i>	<i>52</i>
7.5.2	<i>Vliv kvality dat pro definici okrajových podmínek</i>	<i>54</i>
8	POPIS KABINY MODELOVANÉHO LETADLA	55
8.1	Popis letadla a verzí vybavení kabiny	55
8.2	ECS letadla	57
9	MĚŘENÍ VNITŘNÍHO PROTŘEDÍ V MAKETĚ KABINY	59
9.1	Popis experimentu.....	59
9.1.1	<i>Popis makety a měřicí trati</i>	<i>59</i>
9.1.2	<i>Popis systému pro sběr dat, použitých sond a přístrojů</i>	<i>64</i>
9.1.3	<i>Kalibrace termočlánků a sond</i>	<i>66</i>
9.1.4	<i>Rozbor nejistot měření.....</i>	<i>69</i>
9.2	Popis měřených modelových případů	72
9.3	Statistické zpracování naměřených výsledků - okrajové podmínky.....	73
10	TVORBA A VALIDACE CFD MODELU KABINY	75
10.1	Tvorba geometrie a výpočtové sítě buněk - model makety.....	75
10.2	Definování okrajových podmínek.....	79
10.3	Preprocessing a nastavení simulací.....	80
10.4	Postprocessing výsledků.....	84
10.5	Porovnání výsledků z měření a simulací - souhrn	85
11	OPTIMALIZACE PROSTŘEDÍ V KABINĚ.....	89
11.1	Optimalizovaná technická řešení a definované modelové případy	89
11.2	Geometrie interiéru a typické nastavení okrajových podmínek.....	95
11.3	Optimalizace typu distribuce vzduchu	102
11.3.1	<i>Směšovací větrání.....</i>	<i>102</i>
11.3.2	<i>Modifikované směšovací větrání</i>	<i>106</i>
11.3.3	<i>Semizaplavovací větrání (Distribuce velkoplošnou výustkou)</i>	<i>110</i>
11.3.4	<i>Závěrečné shrnutí vyhodnocení výsledků skupiny OPT 1.....</i>	<i>113</i>
11.4	Optimalizace geometrie distribučních vzduchovodů	116
11.4.1	<i>Vliv umístění připojovacího T-kusu</i>	<i>117</i>
11.4.2	<i>Vliv typu připojení na výkon Modifikovaného směšovacího větrání</i>	<i>120</i>
11.4.3	<i>Vliv geometrie výustek na výkon Modifikovaného směšovacího větrání..</i>	<i>123</i>

11.4.4 Závěrečné shrnutí vyhodnocení výsledků skupiny OPT 2	126
11.5 Optimalizace tloušťky tepelné izolace	127
11.5.1 Vyhodnocení výsledků skupiny OPT 3	130
11.5.2 Závěrečné shrnutí vyhodnocení výsledků skupiny OPT 3	135
11.6 Optimalizace vlastností interiéru - emisivita povrchů	136
11.6.1 Vyhodnocení výsledků skupiny OPT 4	137
11.6.2 Závěrečné shrnutí vyhodnocení výsledků skupiny OPT 4	147
12 ZÁVĚRY.....	149
13 SUMMARY	152
14 LITERATURA A ZDROJE INFORMACÍ	153
15 VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST	157
16 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	160
17 SEZNAM PŘÍLOH	162

1 ÚVOD

Člověk je obecně přizpůsoben prostředí, v kterém se jako druh vyvinul a na rozdíl od většiny ostatních živočišných druhů na Zemi je vybaven aktivním termoregulačním mechanismem. Tento systém je jeho velkou výhodou umožňující aktivitu neomezenou denní dobou a okolní teplotou, ale zároveň i slabinou, neboť vnitřní teplota lidského těla z hlediska citlivému vyladění vnitřních chemických mechanismů musí být neustále udržována v okolí 37 °C. Protože na většině osídlených míst Země nepanují pro udržení této vnitřní teploty ideální okolní podmínky, vytvořil člověk v průběhu dějin různé druhy krytých prostor či obydlí, která jej chránila. Obydlí byla již prakticky od začátku vybavena zařízeními pro udržování požadované teploty (vytápění) a výměnu vzduchu (větrání). S rozvojem civilizace však přibyla i vnitřní prostředí a prostory, která primárně neslouží k ochraně před vnějšími prostředími, ale je nezbytné v nich pobývat v důsledku vázanosti jisté aktivity na tyto prostory. Dnes to tedy mohou být například prostředí ve školách, pracovní prostředí a v neposlední řadě prostředí kabin dopravních prostředků, které je nezbytné použít při dopravě/přepravě na větší vzdálenosti.

Takovými vnitřními prostory jsou i kabiny dopravních letadel. Dle údajů WHO v každé chvíli pobývá v kabinách letadel na celém světě v průměru 500 000 lidí (WOOLS, 2009), přičemž v důsledku rozvoje letecké přepravy roste nejen počet přepravených osob na pravidelných linkách a charterových letech, ale také průměrná délka doby letu (HUNT, a další, 1994), (HUNT, a další, 1995), (AMA, 2003). Výzkumy na přelomu tisíciletí odhalily, že prostředí v kabinách letadel má významný vliv na možnost vzniku či progresi některých závažných onemocnění (DE GIDS, 2003), (AMA, 2003), (DOT, 2001). Na systémy zajišťující úpravu prostředí v kabinách letadel (dále jen ECS – Environmental Control System) jsou proto kladeny nové požadavky z důvodů minimalizace negativních vlivů prostředí na zdraví, komfort a pracovní výkon osob na palubě.

Výsledné mikroklima v kabině letadla je dáno složitou interakcí celé řady fyzikálních procesů. Přítomnost nejrůznějších přenosových mechanismů a velkých přenášených energetických toků v kombinaci s malým prostorem a vysokou koncentrací osob značně sťažuje jeho predikci. Klasické metody pro hodnocení stavu a kvality prostředí ve vnitřních prostorách jsou proto jen obtížně použitelné (KOK, a další, 2005), (MURAKAMI, 2003), (MÜLLER, a další, 2005), (PENNECOT, a další, 2005), (NILSSON, 2004). Situaci navíc podstatně sťažuje fakt, že okolní prostředí vyšších vrstev atmosféry je zcela nevhodné pro pobyt osob (velice nízká teplota, vlhkost, parciální tlak kyslíku). Teprve rozvoj simulačních, vizualizačních a měřících postupů v posledních letech umožnil bližší a podrobnější výzkum mikroklimatu v kabinách letadel. Jeho hlavním cílem je stanovení parametrů vhodných pro popis stavu a kvality prostředí v kabině, vyhodnocení kvality prostředí v kabinách současných dopravních letadel a také jeho zlepšení.

Vytvoření komfortního prostředí v kabině dopravního letadla s ohledem na všechny požadavky a omezení vytváří zásadní výzvu pro výzkum a vývoj týkající se nových či inovovaných systémů ECS. Především se jedná o výzvu v oblasti konstrukční, neboť jsou velice omezeny možnosti variability konstrukčních parametrů systémů. Typicky je požadována především malá hmotnost, malé prostorové nároky pro instalaci, co nejmenší

energetická spotřeba, bezpečnost a spolehlivost provozu, snadná opravitelnost, snadná údržba atd. Návrhem optimalizace konstrukce a provedení některých částí ECS systémů (především distribuce vzduchu do kabiny) z pohledu vlivu těchto konstrukčních úprav na tepelnou pohodu a kvalitu větrání kabiny se zabývá i tato disertační práce.

2 VYMEZENÍ CÍLŮ A LIMITŮ PRÁCE

Vymezení cílů práce

- Vyšetření vlivu konstrukčních úprav vybraných systémů na prostředí v kabině letadla z hlediska – tepelné pohody, distribuce vzduchu a kvality větrání prostoru kabiny - s cílem nalézt optimální kombinaci opatření/konstrukčních řešení.
- Vytvoření CFD modelu kabiny vybraného letadla.
- Proměření vnitřního prostředí v maketě kabiny malého dopravního letadla, při laboratorních okolních a provozních podmínkách za účelem získání dat pro validaci CFD modelu.
- Porovnání/validace výsledků ze CFD modelu s výsledky z měření.
- Definování postupů a doporučení pro optimalizaci prostředí v kabinách malých dopravních letadel a definování doporučení a postupů pro vytváření CFD modelů kabin malých dopravních letadel.

Vymezení limitů práce

- Práce se nezabývá vyhodnocením tepelné pohody v kabině letadla při konkrétních provozních podmínkách, ale pouze při laboratorních nebo návrhových provozních podmínkách.
- Práce se nezabývá návrhem konstrukce konkrétního ECS zařízení, ale pouze vybraných podsystémů (např. systémy vzduchovodů, řešení skladby izolace atd.) .
- Práce se blíže nezabývá vytvářením modelů či programových kódů řešičů CFD softwarů a CFD využívá pouze jako nástroj pro experimenty in silico. Práce tedy neobsahuje podrobnější teoretický popis CFD metody.
- Autor neuvádí v textu práce odkazy/citace svých dřívějších textů, ale pouze kompletní seznam všech publikovaných prací v příloze práce.

Upřesňující poznámky autora

Cílem autora bylo shrnout své poznatky a know-how, které obtížně získal metodou pokus/omyl při řešení některých dílčích úkolů spojených s prací na tématu do jedné ucelené publikace, která by mohla sloužit jako zdroj návodů pro řešení projektů s podobným zaměřením.

V úvodní části práce jsou shrnuty informace o specifické problematice úpravy prostředí v kabinách dopravních letadel. Sám autor při zpracování tématu totiž často narážel na nedostatek informací, nebo na jejich značné rozdrobení do mnoha zdánlivě nesouvisejících zdrojů. Práce však neobsahuje některé základní teoretické informace z oboru technika prostředí a CFD, které jsou snadno dostupné v odborné literatuře.

Pro zvýšení přehlednosti citací používá autor v textu práce odkazování pomocí příjmení autora a roku vydání díla. Autor zastává názor, že tento způsob citování je podstatně přehlednější než odkazování pomocí nic neříkajících číslic v závorkách.

3 ZVOLENÝ POSTUP ŘEŠENÍ

1) Rešerše, přípravné práce

- Získání dostupných pramenů informací, rešerše, uspořádání informací a poznatků o systémech pro úpravy mikroklimatu v kabinách letadel. Informace získané v rešerši byly uspořádány do pojednání k státní doktorské zkoušce.
- Vytipování perspektivních technických a konstrukčních řešení pro další vývoj vybraných systémů.
- Volba postupů a metod pro vyšetřování kvality mikroklimatu a tepelné pohody v kabinách dopravních letadel. Testovací CFD simulace pro odladění postupů a aplikace zvolených metod v CFD modelu.

2) Měření a validace CFD modelu a metodiky

- Sestavení makety, vytvoření a zapojení měřicí trati, oživení měřicí a regulační techniky, vytvoření záznamového a řídicího softwaru.
- Kalibrace sond a čidel, vyladění funkcí měřicí trati.
- Proměření vybraných parametrů vnitřního prostředí v maketě kabiny malého dopravního letadla za laboratorních okolních podmínek.
- Vytvoření CFD modelu - geometrie vycházející z rozměrů reálné makety.
- CFD simulace vnitřního prostředí v kabině malého dopravního letadla s okrajovými podmínkami definovanými na základě dat získaných z měření na maketě.
- Porovnání výsledků z měření s výsledky ze simulací, validace a kalibrace CFD modelu a metodiky tvorby a nastavení výpočetního softwaru.

3) Optimalizace mikroklimatu v kabině letadla

- Optimalizace konstrukce větracího systému a technických opatření za účelem vytvoření optimálního mikroklimatu a tepelné pohody v kabině. Jednotlivé varianty a kombinace variant budou vyšetřovány pomocí validovaného CFD modelu a metodiky.

4) Vyhodnocení získaných výsledků

- Kvalita větrání bude posuzována na základě indexu stáří vzduchu (Age of air).
- Teplotní a proudová pole budou posouzena pouze kvalitativně.
- Pro určení míry tepelné pohody bude využita metodika ekvivalentní teploty a diagram komfortních zón dle ISO 14505-2.

5) Definování závěrů a doporučení z vyhodnocených výsledků

4 MIKROKLIMA, MATABOLIZMUS ČLOVĚKA A TEPELNÁ POHODA

Člověk se jako druh dle aktuálního vědeckého poznání vyvinul cca před 200 000 lety ve východní části afrického kontinentu. V důsledku zákonitostí evolučního vývoje je tedy přizpůsoben podmínkám okolního prostředí:

- okolní čerstvý vzduch o teplotě cca 20 °C
- relativní vlhkosti v rozsahu 30 až 60 %
- rychlost proudění vzduchu cca do 0,5 m/s
- střední radiační teplota cca rovna teplotě vzduchu
- koncentrace CO₂ do 500 ppm
- prachové částice o aerodynamickém průměru 2 μm (a větším)
- žádné umělé chemické sloučeniny.

Těmto podmínkám jsou pak přizpůsobeny všechny systémy a regulační strategie zajišťující interakci a reakce na změny parametrů okolního prostředí. Jedním z hlavních mechanismů přizpůsobení člověka je aktivní termoregulační systém. Na zemi existují kromě savců už jen dva řády živočichů s podobným přizpůsobením a to ptáci a vačnatci. Aktivní termoregulační systém umožňuje aktivitu neomezenou denní dobou a okolní teplotou, na druhou stranu však přináší podstatně zvýšené energetické nároky připadající na aktivní regulaci vnitřní teploty. U člověka je teplota jádra těla udržována na stabilní hodnotě přibližně 37 °C , přičemž změna této teploty o ± 2 °C znamená vážné problémy pro organismus, o ± 4 °C pak vážné nebezpečí smrti v důsledku hypo/hyper termie. Tato citlivost organismu na změnu vnitřní teploty se také odráží v citlivosti lidského organismu na změny okolního prostředí ovlivňující velikost tepelného toku, který je prostředím odjímá/dodává tělu. Pokud je přibližně zachována rovnováha tepelné bilance mezi tělem a prostředím, lze dosáhnout stavu tzv. tepelné pohody, který je většinou osob vnímán jako stav spokojenosti s tepelným stavem okolního prostředí. Protože však na Zemi panují optimální podmínky pro tepelnou pohodu jen po značně omezenou část roku, je nezbytné, aby člověk nepříznivé období přečkal v některém druhu obydlí či krytého prostoru. Tato obydlí jsou již od dávné doby vybavena zařízeními pro úpravu prostředí a to především pro úpravu teploty (vytápění) a udržování čistoty vnitřního vzduchu (technická opatření zajišťující větrání).

4.1 Parametry pro popis stavu vnitřního mikroklimatu

Kvalita vnitřního prostředí se hodnotí podle stavu činitelů prostředí. Tyto činitele zahrnují všechny změny jednotlivých složek prostředí a dalších faktorů, které působí na smysly člověka a mají vliv na jeho fyzický a duševní stav (JANOTKOVÁ, 1991). Tab. 4.1-1 uvádí hlavní mikroklimatické činitele.

Tab. 4.1-1 - Hlavní mikroklimatické činitele

1	Čistota okolního vzduchu	10	Intenzita elektromagnetických polí
2	Teplota vzduchu	11	Intenzita ionizujícího záření
3	Teplota povrchu stěn a předmětů	12	Prostorové a estetické řešení prostředí
4	Rychlost proudění vzduchu	13	Tělesná konstituce člověka
5	Vlhkost vzduchu	14	Činnost člověka
6	Tlak vzduchu	15	Oděv
7	Intenzita osvětlení	16	Schopnost aklimatizace
8	Hluk, vibrace	17	Klima, národnostní zvláštnosti a osobní návyky
9	Koncentrace iontů ve vzduchu	18	Další vlivy - tělesný a psychický stav

Optimální stav vnitřního prostředí je takový stav mikroklimatu, který vytváří člověku vhodné podmínky pro zdravý pobyt a tvořivou práci. Takový optimální stav prostředí nazýváme pohoda prostředí.

Pohodu prostředí cítí člověk komplexně, přesto se však jednotlivé smysly uplatňují natolik specificky, že můžeme hovořit o tepelné, světelné, akustické aj. pohodě prostředí. Některé z výše uvedených činitelů (1 až 11) lze upravit technickými opatřeními, k nimž patří zařízení:

- Vytápěcí - úprava tepelného mikroklimatu
- Klimatizační - úprava tepelného a vlhkostního mikroklimatu
- Větrací - úprava čistoty vzduchu
- Osvětlovací – úprava osvětlení
- Atd.

Činitele 2 až 5, 13 až 15 se navzájem ovlivňují a jejich vhodné hodnoty vytvářejí stav, který se nazývá tepelná pohoda prostředí.

4.2 Tepelná pohoda/tepelný komfort

Tepelná pohoda prostředí se obvykle definuje jako pocit spokojenosti s tepelným stavem prostředí.

Zdravé lidské tělo udržuje za všech podmínek stálou teplotu asi $36,5 \pm 0,5$ °C vnitřní termoregulací, běžně neovlivnitelnou nervovou soustavou člověka. Látkové přeměny (biochemické oxidační procesy) probíhající v lidském těle uvolňují energii, jejíž velikost je především závislá na intenzitě fyzické činnosti a hmotnosti člověka. Většina této energie (90 až 100 %) se transformuje na vnitřní teplo, které musí být z důvodu zachování tepelné rovnováhy odváděno okolím (JANOTKOVÁ, 1991).

Podmínkou tepelné rovnováhy člověka je, aby teplo produkované v těle bylo rovno teplu odvedenému do okolí vedením, konvekcí, radiací, vypařováním a dýcháním. Tepelnou rovnováhu lze vyjádřit rovnicí

$$\dot{Q} = \dot{Q}_{ved} + \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d \quad (4.1)$$

Za normálních podmínek lze tepelný tok přenášený vedením zanedbat a ve většině případů lze předpokládat, že všechno teplo, je nutno odvádět z těla konvekcí, radiací, vypařováním, a dýcháním a rovnici (4.1) lze pak psát ve tvaru

$$\dot{Q} = \dot{Q}_k + \dot{Q}_r + \dot{Q}_v + \dot{Q}_d \quad (4.2)$$

První podmínkou dosažení tepelné pohody je splnění rovnice tepelné rovnováhy (4.2). Pro pocit tepelné pohody je však důležité, jakým způsobem je tepelné rovnováhy dosaženo. Nelze např. hovořit o pohodě, je-li rovnováhy dosaženo vylučováním potu, nebo v zimě snížením teploty pokožky končetin. Lze tedy říci, že stavu tepelné rovnováhy musí být dosaženo při minimálních zásazích tělesné regulace.

Rovnice tepelné rovnováhy je vyjádřena funkční závislostí

$$\dot{Q} = f(R_{cl}, f_{cl}, T_a, w, \bar{T}_r, \varphi) \quad (4.3)$$

Rovnice tepelné pohody vyjadřuje vzájemné vztahy mezi hlavními činiteli tepelné pohody. Tyto činitele charakterizují činnost člověka, vlastnosti oděvu a tepelný stav prostředí.

Na základě rovnice tepelné pohody jsou sestavené diagramy tepelné pohody. Křivky v těchto diagramech jsou křivkami pohody, tzn. že vyhovují rovnici tepelné pohody pro určitou činnost, oděv, teplotu vzduchu, účinnou teplotu okolních ploch, rychlost proudění vzduchu a vlhkost. ECS současných letadel jsou schopny plně řídit teplotu vzduchu, částečně pak rychlost proudění a vlhkost vzduchu. Střední radiační teplotu okolních ploch nelze současnými systémy nijak upravovat.

Diagramy tepelné pohody pro specifické prostředí kabin letadel a činnosti, které jsou v tomto prostředí převážně vykonávány, nebyly v dostupné literatuře dosud publikovány (SPACE, a další, 1999).

4.3 Fyziologie a metabolismus člověka

Jak bylo uvedeno v kapitole 4.1 a 4.2 tělesná konstituce (fyziologie) a činnost člověka společně s oděvem jsou jedny ze základních parametrů ovlivňující tepelnou pohodu člověka. V důsledku funkce metabolismu produkuje člověk v těle teplo, které se skládá z tepla produkovaného bazálním metabolismem a fyzickou funkcí svalů. Množství tepla produkovaného bazálním metabolismem je u zdravého člověka relativně nezávislé na fyzické činnosti a je důsledkem vnitřních funkcí těla nezbytných pro zachování života. Množství tepla produkované svaly je přímo úměrné fyzické činnosti a při vyšších stupních aktivity má zásadní podíl na množství produkovaného tepla. Produkce tepla však musí být v rovnováze s teplem, které odchází z povrchu lidského těla a dýcháním do okolního prostředí. Pouze při dodržení této podmínky je schopné tělo udržovat stálou tělesnou teplotu v rozsahu od 36,8 °C do 37,4 °C (ASHRAE, 2001). Protože se však okolní podmínky i fyzická činnost člověka může v závislosti na okolnostech značně měnit, je nebytné pro udržení stálé tělesné teploty aktivní řízení mechanismů pro produkci či regulaci odvodu tepla z těla. Řídícím systémem je část mozku zvaná hypotalamus, která kontinuálně zpracovává a vyhodnocuje signály z termoreceptorů v pokožce a vnitřních termoreceptorů v míše, břišní dutině, receptorů umístěných v blízkosti velkých žil a v hypotalamu samotném. Termoreceptory v pokožce lze v základu rozdělit na tělíska chladu a tepla. V podstatě jsou to volná nervová zakončení, jejichž hustota rozmístění po celém těle je pravděpodobně výsledkem adaptace člověka v průběhu evoluce. Některé části těla jsou tak citlivější na chlad či na teplo než jiné a lze pozorovat, že citlivé jsou především části, které běžně nejsou kryty oděvem (např. obličej, předloktí) nebo části, které obsahují životně důležité orgány (např. bederní část zad - blízkost ledvin). Naopak na částech, které jsou povětšinou dobře kryty oděvem (např. horní část zad) je hustota tělísek nejnižší.

Principy produkce a přenosu tepla uvnitř člověka

Teplo se tvoří hlavně v jádře těla, tj. játrech, svalech a srdci. V chladném prostředí se zvětšuje rychlost metabolických přeměn (tzv. Q10 efekt) a svalovou činnost doplňuje svalový třes. V případě, že teplota okolí je nižší než teplota tělesná, prostupuje teplo vedením na povrch skrz vrstvy tkáně (svalové, tukové, podkožní vazivo a kůže) a odchází do okolí. Tuková vrstva omezuje tento prostup tepla díky svým izolačním vlastnostem a má velký vliv na celkovou redukci tepelných ztrát lidského těla. Lidé s větším podílem tukové tkáně jsou odolnější vůči působení chladu a naopak hůře dokážou snášet horké prostředí. Kromě prostupu tepla vedením, je nezanedbatelný vliv proudění krve velkými cévami, které se dále rozvětvují do kapilárních a venózních plexů umožňujících prokrvení tkání v blízkosti povrchu. Za normálních okolností se krev vrací k srdci žilami, které vytváří na končetinách dva systémy: jeden povrchový, který vidíme na svých končetinách, a dále systém hluboký, který běží podél tepen mezi svaly. Krev uvnitř hlubokých žil, která je relativně chladnější (vrací se z končetin směrem k srdci) se ohřívá od krve tepen, které jsou hned vedle, tj. dochází k protiproudé tepelné výměně krví (anglicky counter-current heat exchange, zkratka CCX) (POKORNÝ, 2011).

Termoregulace

Termoregulační chování je u člověka nejúčinnějším mechanismem, který zabraňuje ztrátám tepla (oblékání, schoulení se, ukrývání se v závětrí, apod.). V případě, že termoregulační chování nelze použít či je nedostačující pro udržení tepelné rovnováhy, aktivuje hypotalamus termoregulaci na snižování či zvyšování tělesné teploty (POKORNÝ, 2011).

Snižování tělesné teploty

- Vasodilatace cév - je reakce na horko, kterou se rozšíří příčný průřez cév a umožní se větší průtok krve do okrajových částí těla. Zvýšeným prokrvováním pokožky, se celkově zvýší povrchová tělesná teplota a tepelný tok odcházející do okolí, jehož výsledkem je snížení tělesné teploty. Pokud teplota okolí přesáhne povrchovou teplotu člověka, zůstává jediným termoregulačním mechanismem pocení.
- Pocení - je velice účinný způsob ochlazování, kdy se na pokožce vylučuje pot (převážně voda obsahující ionty Na^+ , K^+ a Cl^- , ale i kyselina mléčná a močovina). Voda s ionty se v horkém prostředí začnou odpařovat a tím dochází k odebírání tepla z pokožky. V extrémním horku může vznikat u neaklimatizovaného člověka až 1000 ml potu za hodinu (MARTINÍK, 2011-01-31).

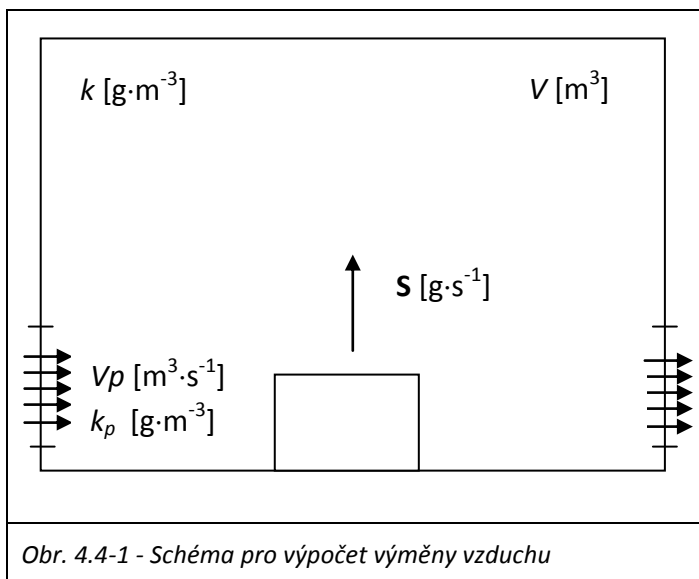
Zvyšování tělesné teploty

- Vasokonstrikce cév - je reakce na chlad, kterou se zúží příčný průřez cév a tím se do okolní tkáně (zejména v oblasti končetin) dostává méně krve, čímž se sníží tepelné ztráty člověka do okolí. Organismus se tak brání podchlazení životně důležitých orgánů na úkor těch okrajových, což je příčinou vzniku omrzlin na okrajových částech těla (konečky prstů, apod.) při extrémně chladných podmínkách.
- Svalový třes - je reakce na chlad vyvolávající zvýšené svalové napětí, které přechází ve svalové kontrakce, čímž dochází k rychlému zvýšení tělesné teploty.
- Chemická termogeneze - působí-li chlad na organismus déle, nastává tvorba tepla chemickou cestou zvýšením rychlosti metabolických přeměn (tzv. Q10 efekt).

V případě selhání termoregulace v extrémních podmínkách člověku hrozí podchlazení (hypotermie) či přehřátí (hypertermie). „Pokud selže mechanismus zvyšování tělesné teploty, dochází k hypotermii, tj. poklesu teploty tělesného jádra pod 35 °C. Při poklesu teploty tělesného jádra pod 34 °C dochází k poruchám vědomí, o dva stupně méně vzniká bezvědomí. Člověk umírá při poklesu teploty tělesného jádra na 24 °C z důvodu selhání dýchání nebo srdce" (Vitalition, 2011). Pokud selže mechanismus snižování tělesné teploty (příčinou může být vysoká teplota a vlhkost, nedostatek vody v těle) dochází k hypertermii, tj. tělesná teplota nekontrolovatelně stoupá hodnotám přes 41 °C, dochází k poruchám vědomí a posléze nastává smrt. I když je člověk v této fázi zachráněn, mozek již může být nevratně poškozen (POKORNÝ, 2011).

4.4 Čistota vzduchu

Přívod čerstvého vzduchu je nezbytnou podmínkou pro udržení kvality a komfortu mikroklimatu ve vnitřních prostorech. Zatímco vytápění a chlazení má za cíl zajistit tepelnou pohodu člověka, větrání musí zajistit přívod dostatečného množství čerstvého vzduchu k udržení koncentrace škodlivin pod maximální požadovanou koncentrací. Hlavními škodlivinami jsou v kabinách letadel oxid uhličitý, těkavé organické sloučeniny, ozón, zplodiny z kouření tabáku, prach a mikrobiologické částice (DECHOW, 1997), (DOUGLAS, 1996), (PIERCE, a další, 1999).



Při výpočtu výměny vzduchu se vychází z rovnice hmotnostní bilance, podle níž se změna množství škodliviny v ovzduší uzavřeného prostoru rovná rozdílu množství škodliviny, které je do prostoru přiváděno (větracím vzduchem) a množství škodliviny, které je z prostoru odváděno. Nezbytná výměna vzduchu se pak určí tak, aby koncentrace škodlivin nepřekročily nejvyšší přípustné hodnoty dle požadavků hygienických předpisů (JANOTKOVÁ, 1991). Pro časový interval dt lze psát rovnici hmotnostní bilance při větrání (podle Obr.4.4-1) ve tvaru

$$Vdk = \dot{V}_p k_p dt + Sdt - \dot{V} k dt \quad (4.4)$$

Řešením této rovnice v časovém intervalu od 0 do t pro změnu koncentrace škodlivin v místnosti z k_1 na k_2 , lze vyjádřit počáteční koncentraci škodlivin k_1 vztahem

$$k_1 = k_2 \exp\left(\frac{t \dot{V}_p}{V}\right) + \left(k_p + \frac{S}{\dot{V}_p}\right) \left(1 - \exp\left(\frac{t \dot{V}_p}{V}\right)\right) \quad (4.5)$$

Řešením této rovnice rozložením v řadu a použitím prvních dvou členů řady dostaneme

$$k_1 = k_2 \left(1 + \frac{t \dot{V}_p}{V}\right) - \left(k_p + \frac{S}{\dot{V}_p}\right) \frac{t \dot{V}_p}{V} \quad (4.6)$$

a odtud množství vyměňovaného vzduchu

$$\dot{V}_p = \frac{S}{k_2 - k_p} - \frac{V}{t} \frac{k_2 - k_1}{k_2 - k_p} \quad (4.7)$$

Rovnice (4.7) dává poněkud menší hodnoty než rovnice (4.5) (zanedbání dalších členů řady), proto se někdy používá korigovaný vztah

$$\dot{V}_p = \frac{S}{k_2 - k_p} - \frac{V}{2t} \frac{k_2 - k_1}{k_2 - k_p} \quad (4.8)$$

Při dlouhodobém větrání a rovnoměrném nepřetržitém vzniku škodlivin lze použít $t = \infty$. Rovnice (4.8) pak dává

$$\dot{V}_p = \frac{S}{k_2 - k_p} \quad (4.9)$$

Škodlivinou může být i teplo. Při větrání prostor se zdroji tepla (nebo tepelnými ztrátami) o celkovém tepelném toku \dot{Q}_z je hmotnostní tok větracího vzduchu dán rovnicí

$$\dot{m}_p = \frac{\dot{Q}_z}{c_p(T_2 - T_1)} \quad (4.10)$$

Při současném vzniku dvou nebo více škodlivin rozlišujeme při výpočtu dva případy.

- Působení látek (škodlivin) na člověka se sčítá (aditivní působení) – objemový tok větracího vzduchu se určí jako součet dílčích objemových toků vzduchu pro jednotlivé škodliviny (JANOTKOVÁ, 1991).
- Působení škodlivin je vzájemně nezávislé – objemový tok větracího vzduchu se určí z hlediska škodliviny, která vyžaduje největší objemový tok přiváděného vzduchu (JANOTKOVÁ, 1991).

4.5 Indexy kvality větrání

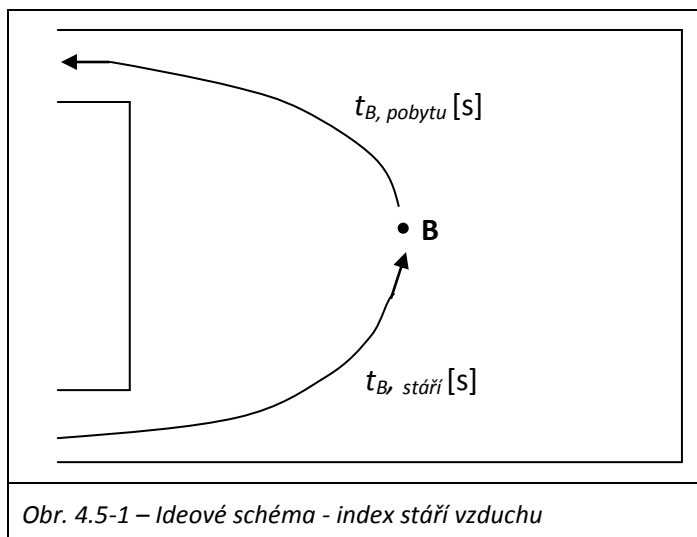
Pro posouzení kvality vzduchu, provětrání a odvodu škodlivin při různých způsobech větrání se používají indexy kvality větrání. Mezi nejdůležitější patří index stáří vzduchu a index efektivity větrání.

Index stáří vzduchu

Index stáří vzduchu patří k základním indexům pro popis kvality vzduchu ve větrané místnosti. Index stáří vzduchu v určitém bodě větraného prostoru vyjadřuje čas, který potřebuje čerstvý vzduch přiváděný do místnosti k dosažení tohoto bodu (viz Obr. 4.5-1). Jinak lze také tento index interpretovat jako čas potřebný k výměně starého vzduchu za čerstvý v daném bodě větraného prostoru. Znalost rozložení indexu stáří vzduchu je nezbytná k určení indexu efektivity větrání. V podstatě existují tři základní metody určování tohoto indexu. Všechny jsou založeny na metodě stopového plynu (CO_2 , SF_6 , atd.). Stopový plyn je zaváděn do přiváděného vzduchu a z koncentrace měřené v daném bodě a z koncentrace na vstupu/výstupu lze určit index stáří vzduchu v bodě měření (VAN

BUGGENHOUT, a další, 2006). Pro metodu využívající postupného zvyšování koncentrace stopového plynu (C_B), lze index stáří vzduchu v bodě B vypočíst dle vztahu

$$t_B = \int_0^{\infty} \left(1 - \frac{C_B(t)}{C_B(\infty)} \right) dt \quad (4.11)$$



Index efektivity větrání

Index v daném bodě větraného prostoru lze vyčíslit z následujícího vztahu

$$e = \frac{t_N}{t_B} \quad (4.12)$$

- kde t_B je index stáří vzduchu v daném bodě B (dle vzorce 4.11) a t_N doba jedné celkové výměny vzduchu v daném větraném prostoru. Tu lze určit ze vztahu

$$t_N = \frac{V}{\dot{V}_p} \quad (4.13)$$

Dle hodnoty indexu efektivity větrání lze konstatovat následující:

- $e > 1$ pak $t_B < t_N$... daný objem v blízkosti bodu B je provětráván s vyšší četností než celkový objem větraného prostoru,
- $e < 1$ pak $t_B > t_N$ daný objem v blízkosti bodu B je provětráván s nižší četností než celkový objem větraného prostoru.

5 MODEL FYZIOLOGIE A TEPELNÉHO KOMFORTU ČLOVĚKA

V předešlé kapitole byly popsány základní parametry pro popis mikroklimatu, kvality větrání, podmínky pro tepelnou pohodu člověka a základní popis fyziologie a metabolismu člověka. V kapitole páté jsou blíže specifikovány modely pro predikci teplot a tepelného komfortu. V roce 2011 zpracoval kolega autora Jan Pokorný pojednání k státní doktorské zkoušce na téma: Vývoj nástroje pro predikci tepelného komfortu v kabině automobilu, v kterém je uveden jeden z nejucelenějších přehledů modelů fyziologie a tepelného komfortu. Podkapitoly 5.1 a 5.2 tak ve velké míře vycházejí z jeho práce. Další podkapitoly jsou věnovány detailnějšímu popisu některých indexů využívaných později k vyhodnocení simulací. Především je v kapitole 5.5 popsán princip a odvození diagramu komfortních zón, který je později v práci využit jako základní nástroj pro vyhodnocení tepelného komfortu/tepelné pohody.

5.1 Modely lidské fyziologie - přehled

Hlavním cílem fyziologických modelů je predikovat tepelný stav lidského těla a jeho reakce na parametry okolního prostředí. Následující přehled historického vývoje modelů lidské fyziologie je založen na práci Jana Pokorného (POKORNÝ, 2011), v níž lze dohledat i všechny relevantní odkazy. Modely lze dle Pokorného rozlišit dle:

a) rozdělení lidského těla

- jednosegmentové – lidské tělo bráno jako celek, vhodné pro homogenní prostředí.
- vícesegmentové – lidské tělo rozděleno na více segmentů, modely rozlišují asymetrické působení okolního prostředí.

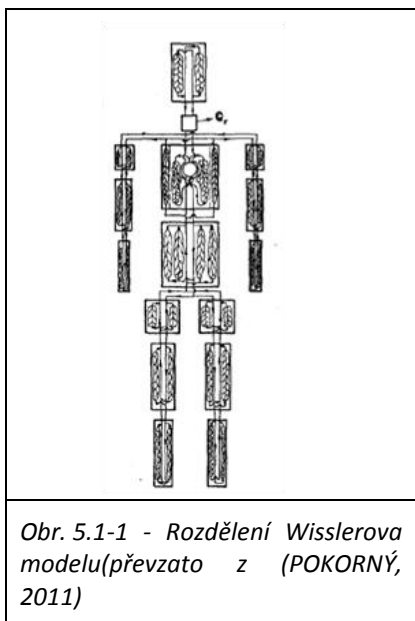
b) dle dynamického hlediska

- stacionární – vhodné pro dlouhodobé vyhodnocování podmínek okolního prostředí.
- dynamické – použitelné i na studium náhlých změn okolního prostředí, počítají s akumulací tepla v pokožce.

První (analytický) model přenosu tepla v živé tkáni sestavil Pennes v roce 1948. Začátkem 60. let Wyndham a Crosbie vytvořili první model fyziologie celého člověka a v roce 1964 na ně navázal Wissler, který lidské tělo rozdělil na více segmentů (viz Obr. 5.1-1). Na přelomu 60. a 70. let Stolwijk vytvořil v jazyce Fortran 25 uzlový vícesegmentový model člověka s uvažováním termoregulace, který Gagge zjednodušil na jednosegmentový s pouze dvěma výpočetními uzly (jádro a kůže) a využil ho pro predikci tepelné pohody pomocí indexů TSENS a TDISC. Snahou dalších autorů (Jones, Lotens, Fu) bylo postihnout kromě samotného lidského těla i vrstvu oděvu, která má značný vliv na tepelnou výměnu mezi člověkem a okolním prostředím. V 90. letech s rostoucími možnostmi výpočetní techniky začaly vznikat 3D modely fyziologie člověka a v roce 1998 Murakami propojil Gaggeův model s CFD simulací okolního prostředí. Po důkladné validaci v roce 2001 Fiala publikoval svůj model, který později převzali a modifikovaly firmy P+Z a Thermoanalytics do svých

komerčních softwarů Theseus-FE a RadTherm a který používají dodnes. Tanabe rozšířil Stolwijkův model a v roce 2002 publikoval jeho propojení se CFD. Pro integraci modelu do CFD se používá tzv. „shell“, tj. geometrie reálného lidského těla, na kterou je vztažena tepelná výměna člověka s okolím a může sloužit i pro zobrazení hodnoty fyziologického modelu. Výše zmiňované modely byly navrženy pro standardního člověka o průměrné výšce a váze. Vzhledem k tomu, že každý člověk je jiný (výška, hmotnost, podíl tuků a svalů v těle, pohlaví, rasa, apod.) bylo by ideální, aby fyziologický model respektoval individuální parametry každého člověka. V poslední době se rozvíjí i tato oblast a vznikají tzv. individualizované modely např. Fialův individualizovaný model, Gaggův individualizovaný model. Individualizované modely jsou náročné na množství požadovaných vstupních dat, ale na rozdíl od běžných průměrovaných modelů mají vyšší vypovídající hodnotu pro konkrétního člověka. V tabulce 5.1-1 je uveden historický přehled vývoje modelů fyziologie člověka. Zleva je uveden rok publikování modelu, jeho hlavní autor a stručná charakteristika modelu (POKORNÝ, 2011).

Fyziologické modely se uplatňují nejen v technice prostředí zabývající se tepelnou pohodou, ale rovněž v lékařství, armádě, sportu, textilním a obuvnickém průmyslu. Například se využívají pro odhad tělesného stavu člověka v extrémních podmínkách (doba přežití ve studené vodě po ztroskotání lodi, tepelný stav vojáka na poušti v plné zbroji, či sportovce při náročných činnostech). Výhodou těchto modelů je široká možnost použití a možnost odhadnout i parametry, které nelze určit přímo měřeními. Na druhou stranu ne vždy se tyto modely shodují s realitou, zejména pokud se využívají mimo rozsah parametrů prostředí, pro které byly vytvořeny a validovány. V dnešní době vývoj výpočetní techniky umožňuje provádět rozsáhlé CFD simulace vnitřního prostředí. Zahrnutím fyziologického modelu do CFD simulace lze analyzovat kvalitu vnitřního klimatu a jeho vliv na člověka. V některých aplikacích (např. simulace prostředí kabin aut, letadel apod.) je navíc důležité zjistit, jaký vliv má člověk na okolní vnitřní klima (POKORNÝ, 2011).



Obr. 5.1-1 - Rozdělení Wisslerova modelu (převzato z (POKORNÝ, 2011))

Tab. 5.1-1 - Historický vývoj modelů fyziologie člověka (převzato z (POKORNÝ, 2011))

Rok	Autor	Popis
1948	Pennes	1 segmentový stacionární analytický model předloktí
1960	Wyndham	1 segmentový dynamický model člověka
1961	Crosbie	1 segmentový stacionární termoregulační model člověka
1964	Wissler	15 segmentový dynamický model člověka
1971	Stolwijk	25 uzlový dynamický termoregulační model člověka
1971	Gagge	2 uzlový dynamický model člověka
1977	Hsu	Kansas State University (KSU) model člověka
1985	Wissler	Rozšířený dynamický 15 segmentový model člověka
1989	Werner	3D dynamický model člověka, 400000 uzlů
1990	de Dear	40 vrstvý model, řešený metodou konečných diferencí
1991	Smith	3D dynamický model člověka
1992	Jones	KSU model s oděvem
1993	Matsunaga	3 segmentový model (pro Isuzu Motors)
1993	Werner	6 segmentový stacionární model
1993	Lotens	Modifikovaný Gaggův model (CCX, oděv)
1995	Fu	3D dynamický model člověka v oděvu
1995	Takemori	3D dynamický model člověka řešený met. kon. prvků
1997	Piniec	Dynamický model člověka MATHER
1997	Shoji	3D dynamický model člověka řešený met. kon. prvků
1998	Murakami	Gaggův model, využití CFD
2001	Huizenga	Fyziologická část Berkeley modelu
2001	Havenith	Gaggův model, využití CFD
2001	Fiala	10 segmentový dynamický model
2002	Tanabe	16 segmentový dynamický model, využití CFD
2003	Kohri	Vícesegmentový Gaggův model
2006	Salloun	15 segmentový Wisslerův model
2007	Lichtenbelt	Individualizovaný Fialův model
2007	Wan	Tanabeho model s detailním popisem vrstev oblečení
2007	Murakami	17 segmentový upravený Tanabeho model
2009	Takada	Individualizovaný Gaggův model
2009	Ferreira	Kombinace modelu od Wisslera a Takemoriho

5.2 Modely tepelné pohody - přehled

Tepelná pohoda úzce souvisí s teplotou, ale není jediným důležitým faktorem ovlivňující lidský tepelný pocit a komfort. Způsob hodnocení spokojenosti s pracovním prostředím zavedl Yaglou a následně Bedford již před 2. světovou válkou. Dodnes je používána Bedfordova stupnice: -3 nepohodlně příliš chladno, -2 nepohodlně chladno, -1 pohodlně chladno, 0 pohodlně, +1 pohodlně teplo, +2 nepohodlně teplo, +3 nepohodlně příliš teplo. Problematikou tepelné pohody a vlivu okolního prostředí se dlouhodobě zabýval

Ole Fanger, který na začátku 70. let specifikoval základní a doplňující faktory ovlivňující tepelnou pohodu ve vnitřním prostředí budov, viz kapitola 5.3. Definoval index popisující předpokládaný střední výsledek hodnocení tepelného pocitu větší skupiny lidí (index PMV) a index vyjadřující procentuální podíl nespokojených s vnitřním prostředím (index PPD). V roce 1984 byla jeho metoda hodnocení tepelné pohody stanovena jako norma, která byla později převzata i do českých norem jako ČSN EN ISO 7730 – Mírné tepelné prostředí – Stanovení ukazatelů PMV a PPD a popis podmínek tepelné pohody (ISO 7730, 2006). Jiný přístup zvolil Gagge, který využil svůj fyziologický model pro predikci střední teploty pokožky a množství vody na pokožce, na jejichž základě je vypočten index tepelného pocitu TSENS a index tepelného diskomfortu TDISC. V roce 2003 Fiala definoval index dynamického tepelného pocitu DTS jako ekvivalent k indexu PMV, který je použitelný i pro časově proměnné podmínky. Index reprezentuje celkový tepelný pocit, který je závislý na střední teplotě pokožky, její časové změně a teplotě tělesného jádra. V tabulce 5.2-1 je uveden rešeršní přehled modelů tepelné pohody, jejichž cílem je zachytit subjektivní vnímání tepelného stavu prostředí. Společným rysem je statistické zpracování dat z dotazníků, ve kterých testovací osoby vyplňují, jak vnímají tepelný stav daného prostředí. Modely se liší způsobem vyhodnocování tepelné pohody (jinak položené otázky, jiný vzorek lidí, různé indexy, atd.). Pro klasifikaci tepelné pohody lze využít rovněž diagramů, které definují rozmezí fyzikálních veličin, pro které je tepelné pohody dosaženo (ekvivalentní teplota t_{eq} , operativní teplota t_o , efektivní teplota ET^* , standardní efektivní teplota SET^* atd.) (POKORNÝ, 2011).

Tab. 5.2-1 - Přehled modelů pro predikci tepelné pohody (převzato z (POKORNÝ, 2011))

Rok	Autor	Popis modelu
1936	Bedford	Měřítka tepelných pocitů, empirický model
1970	Fanger	PMV-PPD model v ISO 7730 od roku 1984
1971	Givoni	Empirický model tepelné pohody
1986	Gagge	Index tepelné pohody TSENS, DISC
1989	Wyon	Model ekvivalentní teploty
1992	Hagino	Empirický model tepelné pohody v autě (pro Nissan)
1992	Taniguchi	Vliv chladného vzduchu na pocit v obličeji (pro Toyota)
1992	Ingersoll	3 segmentový Gagge model, spojený s indexem PMV
1993	Gan	Stacionární model PMV-PPD, využití CFD
1994	Wang	Dynamický model tepelné pohody
1997	Maue	8 segmentový model tepelné pohody
1997	Brown	Empirický model tepelné pohody v autě (pro Ford)
2003	Fiala	Index DTS – dynamický tepelný pocit
2003	Guan	Dynamický vícesegmentový Gaggův model
2003	Zhang	Berkeley model tepelné pohody
2004	Nilsson	Model komfortních zón (v ISO 14505)
2008	Streblow	Propojení modelu Tanabe a Zhang (pro Airbus)
2010	Zhang	Nová verze Berkeley modelu tepelné pohody

5.3 Indexy tepelné pohody

Vzhledem k individuálním odchylkám fyziologických funkcí lidí nelze zajistit žádnou kombinaci veličin, určujících tepelný stav prostředí, podmínky tepelné pohody všem osobám z většího souboru přítomných v konkrétním vnitřním prostoru. Vždy je určitý podíl nespokojených, kteří pociťují tepelnou nepohodu (diskomfort). Doporučené podmínky tepelné pohody se opírají o statistické šetření ze stupnice tepelných pocitů (PMV) (FANGER, a další, 1988), (ISO 7730, 2006).

Tab. 5.3-1 - Stupnice tepelných pocitů pro model PMV-PPD

-3	-2	-1	0	+1	+2	+3
zima	chladno	mírně chladno	neutrálně	mírně teplo	teplo	horko

Index PMV lze vypočítat z rovnice (5.1). Fanger definoval výpočet PMV jako funkční závislost rozdílu tepelné produkce člověka a tepelného toku, který je z těla odváděn okolním prostředím. Pomocí výpočtu indexu PMV lze předpovídat stupeň tepelného pocitu (viz Tab. 5.3-1) skupiny lidí při určité činnosti vystavených prostředí o daných parametrech (FANGER, a další, 1988), (ISO 7730, 2006).

$$PMV = [0,303 \times \exp(-0,036 \times M) + 0,028] \times L \quad (5.1)$$

Měrný tepelný tok, který je odváděn z lidského těla do okolního prostředí o daných parametrech je vyjádřen rovnicí

$$L = M - W - \{3,96 \times 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4] + f_{cl} \alpha_{cl} (T_{cl} - T_a) + 3,05 \times 10^{-3} (5733 - 6,99(M - W) - p_a) + 0,42(M - W - 58,15) + 1,7 \times 10^{-5} M (5867 - p_a) + 0,0014M (34 - T_a)\}, \quad (5.2)$$

kde teplota povrchu oděvu je dána implicitně vztahem

$$T_{cl} = 35,7 - 0,0275(M - W) - R_{cl} \left[3,96 \cdot 10^{-8} f_{cl} [(T_{cl} + 273)^4 - (\bar{T}_r + 273)^4] + f_{cl} \alpha_{cl} (T_{cl} - T_a) \right], \quad (5.3)$$

součinitel zvětšení povrchu těla oděvem je dán vztahem

$$f_{cl} = 1,05 + 0,645 R_{cl}, \text{ pro } R_{cl} > 0,078 \text{ m}^2\text{K/W} \quad (5.4)$$

$$f_{cl} = 1,00 + 1,290 R_{cl}, \text{ pro } R_{cl} \leq 0,078 \text{ m}^2\text{K/W}$$

a součinitel přenosu tepla konvekcí,

$$\alpha_{cl} = 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25}, \text{ pro } 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} \geq 12,1 \times w^{0,5} \quad (5.5)$$

$$\alpha_{cl} = 12,1 \times w^{0,5}, \text{ pro } 2,38(T_{cl} - T_a)^{0,25} < 12,1 \times w^{0,5} \quad (5.6)$$

Procentuální podíl nespokojených (PPD) z přítomných osob v určitém prostředí pak lze vypočítat na základě znalosti PMV dle následujícího vztahu

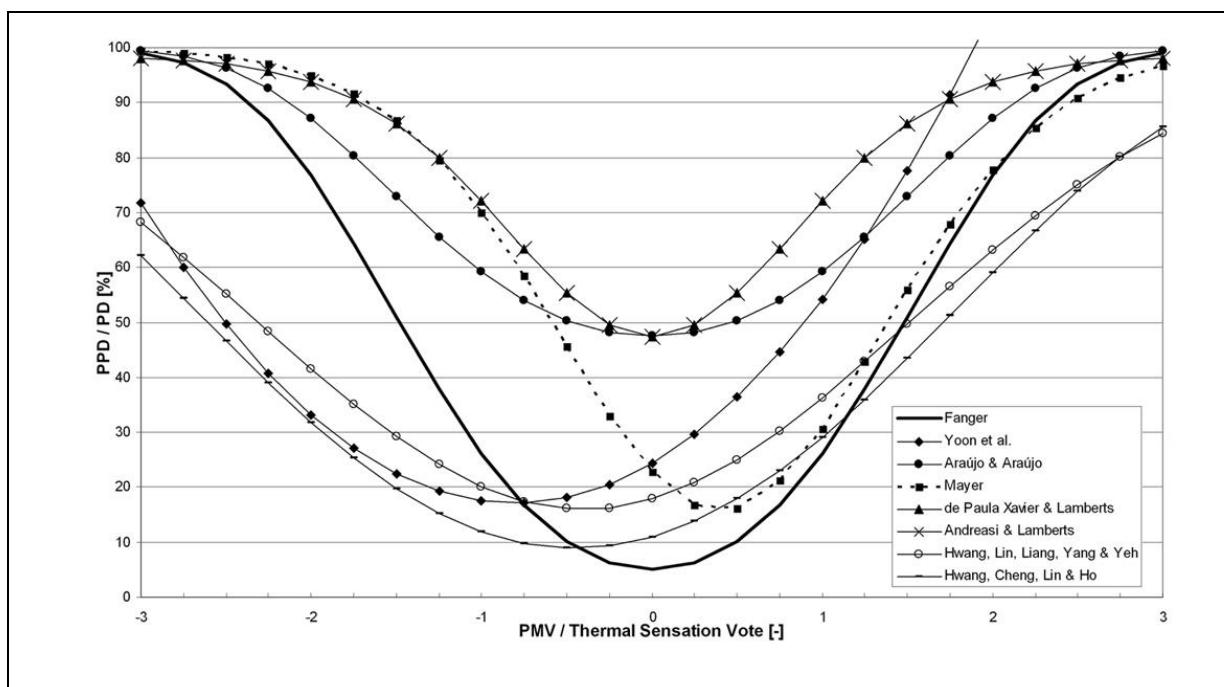
$$PPD = 100 - 95 \times \exp(-0,03353PMV^4 - 0,2179PMV^2) \quad (5.7)$$

Omezení rozsahu modelu

$$M = 46 \text{ W/m}^2 \div 232 \text{ W/m}^2 \text{ (0,8 met } \div \text{ 4 met)}, R_{cl} = 0 \div 0,310 \text{ m}^2\text{K/W (0 clo } \div \text{ 2 clo)}$$

$$T_a = 10 \text{ }^\circ\text{C} \div 30 \text{ }^\circ\text{C}, \bar{T}_r = 10 \text{ }^\circ\text{C} \div 40 \text{ }^\circ\text{C}, w = 0 \text{ m/s} \div 1 \text{ m/s}, p_a = 0 \div 2700 \text{ Pa}$$

Uvedené vztahy poskytují možnost výpočtem stanovit, kolika přítomným bude pravděpodobně vyhovovat určitá kombinace činitelů, které ovlivňují tepelné pocity člověka. Pro $PMV = 0$ je vztah (5.1) rovnicí tepelné pohody (5% nespokojených). Podmínky se považují za přípustné, pokud se index PMV pohybuje v intervalu $(-0,5; 0,5)$, což odpovídá 10 % nespokojených. Model PMV-PPD je použitelný pro normální vnitřní prostředí při lehké či střední tělesné aktivitě (CHÝSKÝ, a další, 1993). Průběh PPD v závislosti na PMV je uveden na obrázku 5.3-1. Originální Fangerův model je vyznačen silnou plnou čarou. Ostatní průběhy jsou výsledky nejrozličnějších modifikací původního modelu, které mají zohlednit vyšší vnímavost člověka k chladu, či různě modifikují minimální hodnotu procentuálního podílu nespokojených.



Obr. 5.3-1 - Závislost indexu PMV a PPD dle Fangera (silná čára) a dalších autorů, kteří provedli korekce modelu (převzato z (POKORNÝ, 2011))

Pro využití pro predikce tepelné pohody v kabinách letadel není tento model příliš vhodný neboť je navržen pro homogenní podmínky prostředí a tělo člověka popisuje jako jednu zónu. Nelze tak tedy rozlišit vliv prostředí na jednotlivé části těla.

Společný účinek přenosu tepla konvekcí a radiací sdružuje tzv. operativní teplota T_o . Představuje jednotnou teplotu černého (z hlediska přenosu tepla radiací) uzavřeného prostoru, ve kterém by docházelo k přenosu tepla konvekcí a radiací ve stejné míře, jako ve skutečném teplotně nesourodém prostoru. Teplota T_o vyplývá z rovnice

$$\alpha_{cl}(T_{cl} - T_a) + \alpha_R(T_{cl} - \bar{T}_r) = \alpha(T_{cl} - T_o) \quad (5.8)$$

Součinitel přestupu tepla α , na pravé straně rovnice, je dán vztahem

$$\alpha = \alpha_{cl} + \alpha_R \quad (5.9)$$

Dosazením rovnice (5.9) do rovnice (5.8) a úpravou dostaneme vztah

$$T_o = A \cdot T_a + (1 - A) \cdot \bar{T}_r \quad (5.10)$$

- kde $A = \frac{\alpha_{cl}}{\alpha} = 0,75 \cdot w_{ar}^{0,16}$ pro $w_{ar} = 0,05$ až 1 m.s^{-1}

Z rovnice tepelné rovnováhy člověka pak lze odvodit následující vztah

$$T_o = \frac{T_s - R_{cl} [24,36 + 0,452 \cdot \dot{q} - 3,05 \cdot 10^{-5} (p_s'' - p_a)]}{1 + 0,0014 \cdot \dot{q} \cdot R_{cl}} \quad (5.11)$$

Z principu operativní teploty vychází i dále zmíněný postup vyhodnocení tepelné pohody na základě ekvivalentní teploty a diagramu komfortních zón (viz kapitola 5.5).

5.4 Index obtěžování průvanem

Průvanem je označováno nežádoucí místní ochlazování lidského těla vyvolané pohybem vzduchu. Intenzita průvanu závisí na rychlosti proudění vzduchu kolem těla a na jejích fluktuacích (makroturbulenci). Fluktuace rychlosti charakterizuje intenzita turbulence.

$$T_u = \frac{s}{\bar{w}} = \frac{\sqrt{\frac{\sum_i (w_i - \bar{w})^2}{n-1}}}{\bar{w}} \quad (5.12)$$

Ta je dána podílem standardní odchylky s , fluktuačních rychlostí w_i , zjištěných v n časových okamžicích a střední rychlosti.

$$\bar{w} = \frac{\sum_i w_i}{n} \quad (5.13)$$

Ve větraných prostorech v zóně pobytu lidí byla zjištěna intenzita turbulence 0,2 až 0,6 při tradičním směšovací větrání. Při zaplavovací větrání jsou intenzity turbulence podstatně nižší. Nejcitlivější na turbulenci jsou odkryté části těla, zejména pak hlava. Fluktuace rychlosti dráždí nervové buňky kůže citlivé na teplotu a zvyšují pocit chladu.

Matematický model vlivu turbulence na pocit průvanu, použitelný pro sedící lehce pracující osoby, sestavil na základě experimentů Fanger (CHÝSKÝ, a další, 1993), (FANGER, a další, 1988). Model umožňuje předpovídat procento nespokojených lidí DR (anglicky draft risk nebo draft rate) v důsledku průvanu

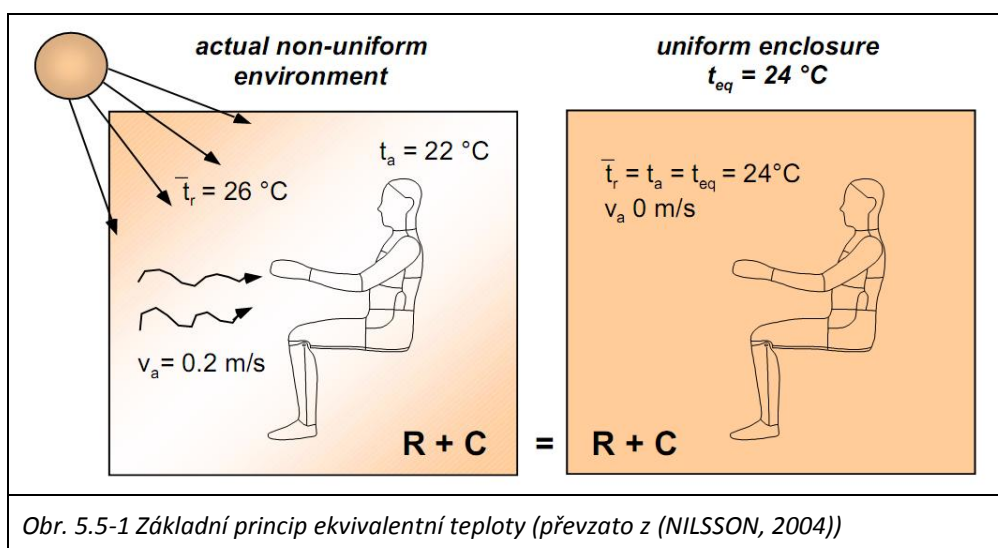
$$DR = (34 - T_a)(\bar{w} - 0,05)^{0,62}(0,37 \cdot \bar{w} \cdot Tu + 3,14), \quad (5.14)$$

kde pro $\bar{w} < 0,05 \text{ m.s}^{-1}$ se dosazuje hodnota $\bar{w} = 0,05 \text{ m.s}^{-1}$ a pro $DR > 100$ hodnota $DR = 100\%$.

5.5 Nilssonův model/Diagram komfortních zón

Pro posuzování tepelné pohody v kabinách dopravních prostředků se v posledních letech stále častěji využívá metody vypracované H. O. Nilssonem v roce 2004 (NILSSON, 2004). Je založena na určení ekvivalentní teploty jednotlivých částí těla a vyhodnocení tepelného pocitu v diagramu komfortních zón. Metoda byla přímo vyvinuta pro použití v kabinách dopravních prostředků a zohledňuje specifičnost daného vnitřního prostředí (nehomogenost teplotního pole, vysoké rychlosti vzduchu, vliv solárního záření atd.). V roce 2006 byl Nilssonův model standardizován a na jeho základě vznikla norma ISO 14505 posléze přejatá jako ČSN, ISO ČSN EN 14505 - Ergonomie teplého prostředí - Hodnocení tepelného prostředí ve vozidlech (ISO 14505, 2007)

Zjednodušeně lze popsat stav prostředí parametry jako vlhkost vzduchu, teplota vzduchu, střední radiační teplota a rychlost proudění vzduchu. V kombinaci s faktory popisujícími kvalitu oděvu a metabolické teplo odpovídající dané činnosti člověka, lze definovat ekvivalentní teplotu. Ekvivalentní teplota je definována jako: Teplota imaginárního uzavřeného prostoru kde je střední radiační teplota rovná teplotě vzduchu a vzduch je klidný, a v kterém má lidské tělo stejnou tepelnou výměnu radiací a konvekcí jako v aktuálním prostředí (NILSSON, 2004)(princip je vysvětlen a obrázku 5.5-1). Definice je tedy velice podobná definici operativní teploty.



Ekvivalentní teplotu lze dle (MADSEN, a další, 1984) určit z empirického vztahu:

$$T_{eq} = T_0 = 0,5 \cdot (T_a + \bar{T}_r) \quad \text{pro } w < 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.14)$$

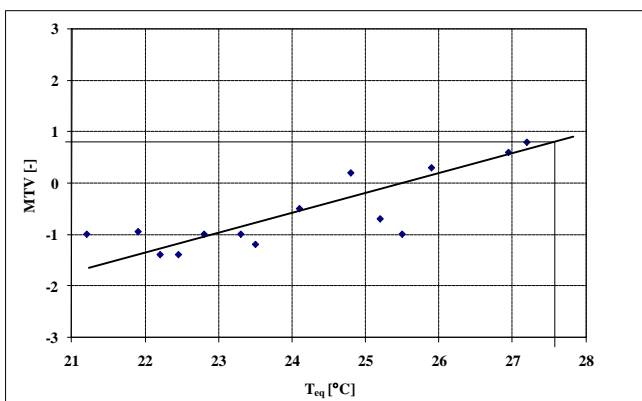
$$T_{eq} = 0,55 \cdot T_a + 0,45 \cdot \bar{T}_r + \frac{0,24 - 0,75 \cdot \sqrt{w}}{1 + R_{cl}} (36,5 - T_a) \quad \text{pro } w > 0,1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (5.15)$$

Dle (NILSSON, a další, 2000) lze ekvivalentní teplotu pro oblečeného člověka určit dle vztahů:

$$T_s = 36,4 - 0,05 \cdot \dot{q} \quad (5.16)$$

$$T_{eq} = T_s - R_{cl} \cdot \dot{q} \quad (5.17)$$

Měrný tepelný tok \dot{q} v rovnicích 5.16 a 5.17 zahrnuje tepelnou ztrátu konvekcí a radiací. Pro nalezení hodnot měrného tepelného toku byly využity výsledky měření s tepelnými manekýny, jejichž povrch byl rozdělen do částí např. trup, paže, stehno, hlava atd. Každá tato část byla zahřívána průchodem elektrického proudu na konstantní teplotu, čímž bylo možné získat hodnoty tepelných toků přenášených z povrchu. Tepelní manekýni byly společně s respondenty vystavovány různým mikroklimatickým podmínkám. Respondenti hodnotili tepelný pocit (Mean Thermal Vote – MTV) jednotlivých částí těla a souběžně byl zaznamenáván tepelný tok přenášený ze shodných částí tepelných manekýnů. Ze zaznamenaných tepelných toků, byla dle rovnice 5.17 vyčíslena ekvivalentní teplota a k ní přiřazen tepelný pocit respondentů (MTV). Na obrázku 5.5-2 je uveden příklad závislosti MTV a ekvivalentní teploty pro případ stehna v zimním období a pro zimní oblečení.



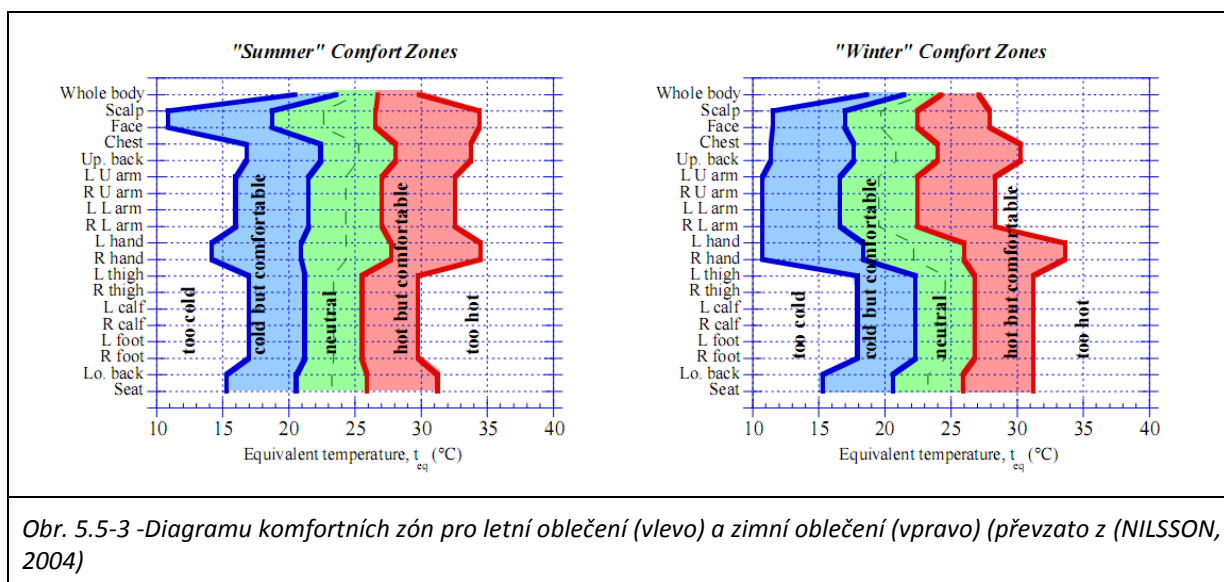
Obr. 5.5-2- Příklad závislosti MTV na ekvivalentní teplotě. Závislost pro stehno, zimní oblečení (převzato z (ŠPONIAR, a další, 2007))

Ze zaznamenaných tepelných toků, byla dle rovnice 5.17 vyčíslena ekvivalentní teplota a k ní přiřazen tepelný pocit respondentů (MTV). Na obrázku 5.5-2 je uveden příklad závislosti MTV a ekvivalentní teploty pro případ stehna v zimním období a pro zimní oblečení.

Podobné korelace byly stanoveny pro jednotlivé části těla. Po nalezení těchto korelací je možné sestavit diagram komfortních zón. V něm se pak rozlišují oblasti : neutrální, chladno ale příjemně, teplo ale příjemně, nepříjemně chladno a nepříjemně teplo. Hranice pro neutrální oblast byla stanovena pro hodnotu MTV = ±0,8 (80 % respondentů spokojeno s pocitem na dané části těla) a oblasti příjemného chladu a tepla byly stanoveny pro hodnotu MTV = ±1,5 (ŠPONIAR, a další, 2007). Na obrázku 5.5-3 je uveden příklad diagramu komfortních zón pro letní a zimní oblečení. První shora je v diagramu uveden rozsah ekvivalentních teplot pro celé tělo (část whole body). Tato teplota se vyčísluje na základě

ekvivalentních teplot jednotlivých částí jako vážený průměr všech ekvivalentních teplot, přičemž váhami jsou plochy jednotlivých segmentů/částí těla (viz Tab. 11.2-2). Z diagramů je také patrné, že různé části těla mají různé rozsahy teplot pro jednotlivé zóny. Například u obličeje (Face) a hlavy (Scalp) je rozsah teplot pro zóny 'chladno ale příjemně' až 'teplo ale příjemně', od teploty 10,9 do 26,2 °C zatímco u levého chodidla je to pouze rozsah od 17,0 do 25,5 °C. Metoda tedy dobře zohledňuje rozdílnou citlivost vnímání tepelného stavu prostředí na různých částech těla.

Celkové tepelné pohody je z pohledu definice dosaženo, pokud jsou všechny části těla včetně ekvivalentní teploty celého těla (whole body) v neutrální oblasti (NILSSON, 2004). Při aplikaci tedy může nastat případ, kdy jsou všechny jednotlivé části těla v neutrální zóně, ale protože se nacházejí v blízkosti přechodu do zón 'chladno ale příjemně', nebo 'teplo ale příjemně' je celková ekvivalentní teplota mimo neutrální zónu. Takový stav však nelze považovat za stav celkové tepelné pohody/tepelného komfortu.



Při využití Nilssonova modelu v CFD se ekvivalentní teplota pro každý segment těla určuje dle vztahu 5.18.

$$T_{eq} = T_s - \frac{q_{real}}{h_{virtual}} \quad (5.18)$$

Kde:

T_s je teplota povrchu figuríny (34 [°C])

q_{real} je tepelný tok z části figuríny v aktuálním prostředí [W/m^2]

$h_{virtual}$ je součinitel přenosu tepla získaný z virtuální kalibrace v homogenní podmínkách dle definice ekvivalentní teploty [W/m^2K]

Teplota povrchu figuríny vychází z podmínek, za jakých Nilsson prováděl měření a na jejichž základě vznikly diagramy komfortních zón uvedené na obrázku 5.5-3. Součinitel přenosu tepla závisí na konkrétní geometrii figurín a její poloze v měřeném prostředí. Správné určení kalibračních koeficientů přenosu tepla tedy významnou měrou ovlivňuje

kvalitu výpočtu ekvivalentní teploty. Koeficienty mohou být získány měřením na reálné figuríně nebo pomocí simulace, která se nazývá virtuální kalibrace. Ta spočívá ve vytvoření speciální simulace, kdy je figurína umístěna do kalibračního boxu o rozměrech 2 x 2 x 2 m (viz Obr. 11.2.5), v kterém je prakticky celá podlaha boxu využita jako vstup pro přívod vzduchu o nízké rychlosti (0,03 m/s) a celá plocha stropu pak slouží jako výstup. Velká plocha vstupu a výstupu zaručuje dobrý odvod tepla generovaného figurínou a zajišťuje tak zachování požadovaných homogenních kalibračních podmínek. Teplota přiváděného vzduchu i všech okolních stěn je nastavena na 24 °C (bližší popis kalibrace viz kapitole 11.2). Za těchto podmínek jsou zjištěny tepelné toky z jednotlivých segmentů/částí těla ($q_{virtual}$) a na základě rovnice 5.19 jsou vypočteny jednotlivé virtuální kalibrační koeficienty přenosu tepla $h_{virtual}$, které se pak využívají ve vztahu 5.18.

$$h_{virtual} = \frac{q_{virtual}}{T_{sk} - T_a} \quad (5.19)$$

Model je vhodný pro použití v CFD simulacích, protože jej lze relativně snadno aplikovat v dnes běžně dostupných CFD kódech, zatímco většina modelů uvedených v kapitolách 5.1 a 5.2 vyžaduje speciální software (někdy zvaný middle-ware) na propojení samotného fyziologického modelu lidského těla a modelu tepelné pohody se CFD simulací. Takovým middle-warem je například program TISC (od firmy TLK-Thermo GmbH) umožňující projit simulační program Theseus-FE, který má integrován Fialův model se CFD programem Star-CCM+. Program však vyžaduje speciální server, složitou konfiguraci síťové komunikace a speciální typ licencí u všech propojených programů, což vede k veliké náročnosti nejen z pohledu znalostí a know-how, ale i z pohledu finančního.

6 VĚTRÁNÍ KABIN LETADEL

Čistota vzduchu a tepelná pohoda jsou dva základní předpoklady pro vytvoření kvalitního prostředí pro komfortní pobyt a náročnou duševní práci. Vnitřní prostředí kabiny letadla je zatíženo celou řadou pro člověka nežádoucích škodlivin (viz kapitola 6.1.). Je proto s podivem, že požadavky na kvalitu prostředí a funkce větracích systémů jsou v současných předpisech formulovány jen velice obecně s minimem konkrétních hodnot a požadavků a nejnovější předpisy v této oblasti mají zatím pouze charakter doporučení (viz kapitola 6.2). Pro větrání kabin současných dopravních letadel se používá celkové větrání (viz kapitola 6.3.1). V posledních letech probíhá výzkum za účelem využití jiných způsobů distribuce větracího vzduchu do prostoru kabiny (viz kapitola 6.3.2 a 6.3.3). Pozornost je také věnována distribučním vzduchovodům (viz kapitola 6.3.4) a koncovým prvkům (viz kapitola 6.4), jejichž konstrukce má zásadní vliv na výsledný tvar proudového pole ve větraném prostoru. Poznatky a informace uvedené v kapitole šesté vycházejí především z literatury týkající se větrání kabin velkých dopravních letadel. Obdobné informace pro kategorii malých letadel nejsou stále v dostupné literatuře k dispozici.

6.1 Sledované škodliviny

Oxid uhelnatý CO

Oxid uhelnatý je bezbarvý plyn bez chuti a zápachu, lehčí než vzduch, nedráždivý. V přírodě je přítomen v nepatrném množství v atmosféře, kde vzniká především fotolýzou oxidu uhličitého působením ultrafialového záření a jako produkt nedokonalého spalování. V nepatrném množství vzniká i metabolickými procesy v živých organismech, a proto je obsažen ve stopovém množství ve vzduchu vydechovaném z plic. Oxid uhelnatý je značně jedovatý; jeho jedovatost je způsobena silnou afinitou k hemoglobinu, s nímž vytváří karboxyhemoglobin, čímž znemožňuje přenos kyslíku v podobě oxyhemoglobinu z plic do tkání. Příznaky otravy se objevují již při přeměně 10 % hemoglobinu na karboxyhemoglobin. Vazba oxidu uhelnatého na hemoglobin je přibližně dvěstěkrát silnější než kyslíku a proto jeho odstranění z krve trvá mnoho hodin až dnů. Z tohoto důvodu je koncentrace CO sledována a její maximální povolené koncentrace jsou upraveny předpisy dle FAR 23.831 a FAR 25.831. Hlavním zdrojem CO v kabinách letadel je kouření tabáku a v malé míře i metabolismus cestujících.

Oxid uhličitý CO₂

Oxid uhličitý je přirozeným produktem lidského metabolismu a cestující jsou hlavním zdrojem tohoto plynu v kabině letadla (dalším významným zdrojem může být suchý led používaný pro chlazení potravin). Koncentrace CO₂ v kabině se mění se změnou koncentrace v okolním vzduchu, s počtem lidí na palubě a jejich aktivitou. Koncentrace CO₂ je často užívána jako ukazatel kvality vzduchu. Měření u náhodně vybraných letů ukázala, že v kuřáckých i nekuřáckých částech letadla je průměrná koncentrace CO₂ 1500 ppm. (Naměřené minimum 597 ppm, maximum 4943 ppm) (HOCKING, 2000), (PIERCE, a další, 1999), (SPACE, a další, 1999).

Limitní hodnota pro CO₂ je 5000 ppm (časově vážený průměr), což odpovídá přibližně 1,1 dm³·s⁻¹ čerstvého vzduchu na osobu pro udržení této koncentrace. Při určení této hodnoty se vycházelo z běžné osmihodinové pracovní doby a také z toho, aby pracovníci mohli být této koncentraci opakovaně vystavováni bez zdravotních rizik.

ASHRAE standard 62, který však neplatí pro leteckou dopravu uvádí: „Ventilací by se měla zajistit taková výměna vzduchu, aby koncentrace CO₂ nepřesáhla 1000 ppm.“ Nicméně tato koncentrace není stanovena s ohledem na lidské zdraví, ale z důvodu odvodu nežádoucích pachů. Koncentrace 1000 ppm tedy není závazná, ale je směrodatná pro zachování kvality vzduchu (ANSI/ASHRAE, 1989), (HUNT, et al., 1994), (SPACE, a další, 1999), (DOT, 2001).

Prach a mikrobiologické částice

Mezi biologické částice patří viry, bakterie, spóry hub a plísní, pyly, zbytky lidské kůže, vlasů atd. Zdrojem prachu v kabině jsou především textilie oděvů osob na palubě a materiály vybavení kabiny. Při pozemním provozu je také přiváděn do kabiny prach a mikrobiologické částice s čerstvým větracím vzduchem.

Pro odstranění prachu a biologických částic z oběhového vzduchu jsou používány filtry, v současných letadlech především typu HEPA, které dosahují účinnosti zachycení 99,97 % pro částice o průměru 0,3 μm. Většina bakterií (cca 99%) je větších než 1 μm. Viry mají střední velikost v rozmezí od 0,01 do 0,5 μm, nepohybují se však v prostoru samostatně, ale jsou většinou přítomny na povrchu větších částic (tzv. nosičů) např. bakterií, kapiček vody atd., a proto jsou většinou filtry také zachyceny (LAJČÍKOVÁ, 2003). Výsledky měření u 92 náhodně vybraných letů prokázala, že koncentrace mikrobiologických částic v kabinách letadel je stejná či dokonce nižší než v běžném domě. Tato nízká koncentrace je způsobena vysokou čistotou okolního vzduchu v běžných letových výškách a vysokou účinností filtrů oběhového vzduchu (DECHOW, 1997), (SPACE, a další, 1999).

Ozón

Ozón je přítomný v atmosféře jako produkt fotochemické přeměny kyslíku při účinku ultrafialového záření. Koncentrace ozónu se mění s ročním obdobím, nadmořskou výškou, zeměpisnou šířkou a počasím. Koncentrace ozónu vzrůstá se zvětšující se zeměpisnou šířkou a je maximální v průběhu jara (podzimu na jižní polokouli). Koncentrace ozónu v kabině je závislá na venkovní koncentraci, na konstrukci větracího systému, na systému řízení a hlavně na tom, zda je či není instalován katalytický ozónový filtr.

Přípustné koncentrace ozónu v kabině jsou dány předpisy FAR 121.578 a FAR 25.832. Použití katalytického filtru je vyžadováno v letadlech, kde se předpokládá, že by mohly být překročeny limitní koncentrace. V současné době nejsou v normě FAR/JAR 25 uvedeny žádné limitní koncentrace pro ozón (SPACE, a další, 1999).

Tabákový kouř

V současné době neexistuje žádná norma týkající se problematiky tabákového kouře v kabinách letadel. Nicméně v roce 1986 byl přijat zákaz kouření na vnitrostátních letech v USA za účelem zabránit možnosti vzniku požáru od nedopalku cigarety a snížit obtěžování

cestujících a posádky kouřem. Na letech, kde je kouření povoleno, je koncentrace kouře nepřímo měřena koncentrací CO a množstvím respirabilních částic (RSP).

Měřené koncentrace CO v kuřácké části letadla během maximálního zatížení kouřem prokázaly, že koncentrace škodlivin jsou v přípustných hodnotách. Koncentrace RSP v kuřácké části kabiny může překročit maximální požadovanou hodnotu v době nejvyššího zatížení kouřem. Tyto hodnoty jsou však běžné i v jiných tabákovým kouřem zatížených prostorách (restaurace, bary, diskotéky). Při měření provedených při 92 letech byly naměřeny koncentrace RPS průměrně $40 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v nekuřácké části a $175 \mu\text{g}\cdot\text{m}^{-3}$ v kuřácké části letadla (SPACE, a další, 1999).

Těkavé organické sloučeniny

Těkavé organické sloučeniny (volatile organic compounds - VOCs) mohou vylučovat materiály použité v interiéru kabiny, desinfekce, čisticí prostředky, insekticidy (používané v kabině na hubení hmyzu přenášejícího nebezpečné choroby (DOT, 2001)), jídlo a nápoje. Měření provedená ATAA (Air Transport Association of America) v roce 1994 prokázala velice nízkou koncentraci těchto látek v kabině letadla. Tato koncentrace je natolik nízká, že představuje jen malé zdravotní riziko (SPACE, a další, 1999).

Parameter	Acceptable Condition ^A
Cabin Temperature ^B	Target operative temperature range, in-flight and ground operations: 65°F to 75°F (18.3°C to 23.9°C) Operative temperature in flight shall not exceed 80°F (26.7°C), whether or not in-flight entertainment systems (IFE) are operating. Operative temperature during ground operations shall not exceed 80°F (26.7°C) if IFE are not present or not operating, and 85°F (29.4°C) if all IFE are operating. Design control tolerance to set point: $\pm 2^\circ\text{F}$ ($\pm 1.1^\circ\text{C}$) Design overshoot to set point: $< 3^\circ\text{F}$ ($< 1.7^\circ\text{C}$)
Local Air Speed ^C	Seated passengers and crew: $< 70 \text{ ft/min}$ ($< 0.36 \text{ m/s}$) Draft sensitive bare body areas: $< 60 \text{ ft/min}$ ($< 0.30 \text{ m/s}$) [$< 40 \text{ ft/min}$ ($< 0.20 \text{ m/s}$) recommended] Head level with PAO turned on: $> 200 \text{ ft/min}$ ($> 1.0 \text{ m/s}$) Head level with PAO not installed: $> 20 \text{ ft/min}$ ($> 0.1 \text{ m/s}$)
Temperature Spatial Variations ^D	Horizontal operative temperature variation across each temperature control zone: $< 8^\circ\text{F}$ (4.4°C) Vertical operative temperature variation within a seat (seat centerline): $< 5^\circ\text{F}$ (2.8°C) variation in temperatures measured at 4 in., 24 in., and 43 in. (100 mm, 610 mm, and 1090 mm).
Maximum Surface Temperature Differential for Seated Occupants	Average temperature of sidewall surface ^E shall be within 10°F (5.6°C) of the average operative seating area temperature (the average for 4 in., 24 in., and 43 in. [100 mm, 610 mm, and 1090 mm] from the floor). Temperature of the floor surface measured at the occupant's feet shall be within 10°F (5.6°C) of the average operative seating area temperature (the average for 4 in., 24 in., and 43 in. [100 mm, 610 mm, and 1090 mm] from the floor).
Maximum Surface Temperature Differential in Galleys, Adjacent to Doors	Average temperature of galley sidewall surface ^F should be within 10°F (5.6°C), and shall be within 15°F (8.4°C), of the average operative galley temperature measured at 43 in. from the floor. Average temperature of galley floor surface measured at crew work stations or jumpseats should be within 10°F (5.6°C), and shall be within 15°F (8.4°C), of the average operative galley temperature measured at 43 in. (1090 mm) from the floor.

A. See ANSI/ASHRAE Standard 55-2004⁴ for measurement and calculation of operative temperatures in this table.
B. Applies to all occupied locations.
C. Maximum value averaged over two-minute period. Occupant acceptability of a given air velocity will vary with supply air temperature. Draft sensitive body areas are the ankles and the neck.
D. Includes the region 2 in. (50 mm) or more from the sidewalls, between 4 in. (100 mm) and 43 in. (1.1 m) above the floor in seating areas, and between 4 in. (100 mm) and 67 in. (1.7 m) in aisles and galleys. These requirements shall apply when the personal air outlet nozzles are closed.
E. Sidewall temperature measured at ankle, waist, and head levels: 4 in. (100 mm) (or at the lowest practical location on the sidewall), 24 in. (0.6 m), and 43 in. (1.1 m) from the floor.
F. Sidewall temperature measured at ankle, waist, and head levels: 4 in. (100 mm), 43 in. (1.1 m), and 67 in. (1.7 m) from the floor.

Obr 6.2-1 - Tabulka doporučených teplot a rychlostí vzduchu v kabině (převzato z (ANSI/ASHRAE, 2007))

6.2 Požadavky na větrání kabin letadel dle FAR 23.831, 25.831 a ASHRAE 161-2007

Předpis FAR 23.831 upravuje požadavky na větrání kabin letadel (pro maximálně 9 cestujících) z hlediska kvality vzduchu v kabině a funkcí větracího systému takto:

- Prostory kabiny pro cestující a posádku musí být dostatečně větrány. Koncentrace oxidu uhelnatého (CO) nesmí překročit hodnotu 1 díl CO na 20 000 dílů vzduchu.
- Pro letadla s přetlakovou kabinou platí: Vzduch v kabině nesmí obsahovat plyny a páry látek v koncentracích životu nebezpečných ani zdraví škodlivých. Těchto koncentrací nesmí být dosaženo při žádné nezanedbatelně pravděpodobné částečné či úplné poruše větracího, vytápěcího, přetlakového či jiného systému a vybavení. Jestliže je nezanedbatelně pravděpodobný vznik kouře v prostoru pilotní kabiny musí být systém schopen odsát kouře, bez nebezpečí poklesu tlaku v kabině pod bezpečnou úroveň.

Protože předpis FAR 23.831 obsahuje bližší specifikace maximálních koncentrací pouze pro CO a nespecifikuje jiné plyny ani minimální množství přiváděného čerstvého vzduchu na jednu osobu, vychází se v praxi většinou z požadavků předpisu FAR 25.831. Následující odstavce obsahují výťah z předpisu týkající se daných požadavků.

- Větrací systém letadla musí přivádět dostatečné množství čerstvého vzduchu, aby posádka mohla vykonávat své pracovní povinnosti bez nepřiměřené nepohody či únavy a také toto množství musí zajistit dostatečný komfort cestujících. Toto množství větracího vzduchu musí být přiváděno za normálních provozních podmínek i v případě vzniku jakékoliv nezanedbatelně pravděpodobné poruchy větracího systému či jiných systémů, které mohou mít vliv na funkci větracího systému. Větrací systém musí být navržen tak, aby za normálních provozních podmínek dodával 0,25 kg/min čerstvého vzduchu na osobu.
- Koncentrace oxidu uhličitého (CO₂) v průběhu letu nesmí překročit hodnotu 0,5 % z objemu v žádné části kabiny, v které je běžná přítomnost cestujících či členů posádky.
- Vlhkost vzduchu nesmí ohrožovat chod elektronických zařízení a způsobovat korozi ostatních částí letadla v důsledku kondenzace vodní páry.
- Relativní vlhkost vzduchu musí být regulována klimatizačním systémem a musí se pohybovat v rozmezí 5 - 35%.

V roce 2007 byla na základě výsledků projektu CabinAir a dalších vydána souhrnná norma/doporučení pro parametry prostředí v kabinách letadel ANSI/ASHRAE 161/2007 Air quality within commercial aircraft. Norma upřesňuje minimální a doporučené hodnoty

Teploty v kabině

- teploty vzduchu v kabině pro cestující

- teplotní diferenci mezi podlahou a stropem
- rozdíly povrchové teploty vůči operační teplotě
- konkrétní hodnoty viz Obr. 6.2-1

Větrání kabiny

- rychlosti proudění vzduchu v prostoru kabiny
- minimální objem venkovního vzduchu na jednu osobu $3,5 \text{ dm}^3/\text{s}$ při efektivitě větrání $e = 1$. Pokud je efektivita nižší, objem venkovního vzduchu se vypočte na základě vztahu $3,5/e$.
- celkový objem přiváděného větracího vzduchu na jednu osobu $7,1 \text{ dm}^3/\text{s}$
- doporučený objem přiváděného větracího vzduchu na jednu osobu $9,4 \text{ dm}^3/\text{s}$

Ostatní doporučení normy se týkají speciálních prostor jako jsou kuchyňky, odpočinkový prostor posádky, míst pro letušek atd., která se však v kabinách malých letadel běžně nevyskytují.

6.3 Způsoby distribuce větracího vzduchu

Jedním z mnoha činitelů, který poměrně výrazně ovlivňuje stav prostředí ve vnitřních prostorech, je proudění větracího vzduchu ve větraném prostoru. Na proudění vzduchu ve větraných prostorech má především vliv druh, počet, umístění a velikost přiváděcích výustek, dále rychlost a teplota přiváděného vzduchu a nezanedbatelný vliv má i rozmístění zdrojů tepla a chladu, které vytvářejí konvekční proudy. Pro účely komplexního hodnocení stavu vnitřních větraných prostor je možné výše uvedené parametry větracího systému sjednotit do souhrnného názvu distribuce vzduchu ve větraném prostoru (CHÝSKÝ, a další, 1993).

6.3.1 Celkové větrání (*Mixing ventilation*)

Tento způsob distribuce větracího vzduchu spočívá ve využití koncových prvků s relativně malou plochou v porovnání s plochou stěn větraného prostoru. V důsledku toho je výstupní rychlost a hybnost přiváděného vzduchu vysoká. Obsah větraného prostoru je neustále celkově promícháván a čerstvý vzduch snižuje koncentraci škodlivin ve větraném prostoru. V kabinách velkých dopravních letadel jsou přiváděcí výustky ve většině případů umístěny v blízkosti stropu. Primární proudy jsou orientovány od stěn ke středu (viz Obr. 6.3.1-1) nebo od středu ke stěnám kabiny (viz Obr. 6.3.1-2). Výstupní rychlost vzduchu z přiváděcích výustek je cca $2,5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a proudy jsou vždy směřovány tak, aby v kabině vzniklo tzv. „válcové rotační“ proudové pole. To sebou přináší některé zásadní výhody :

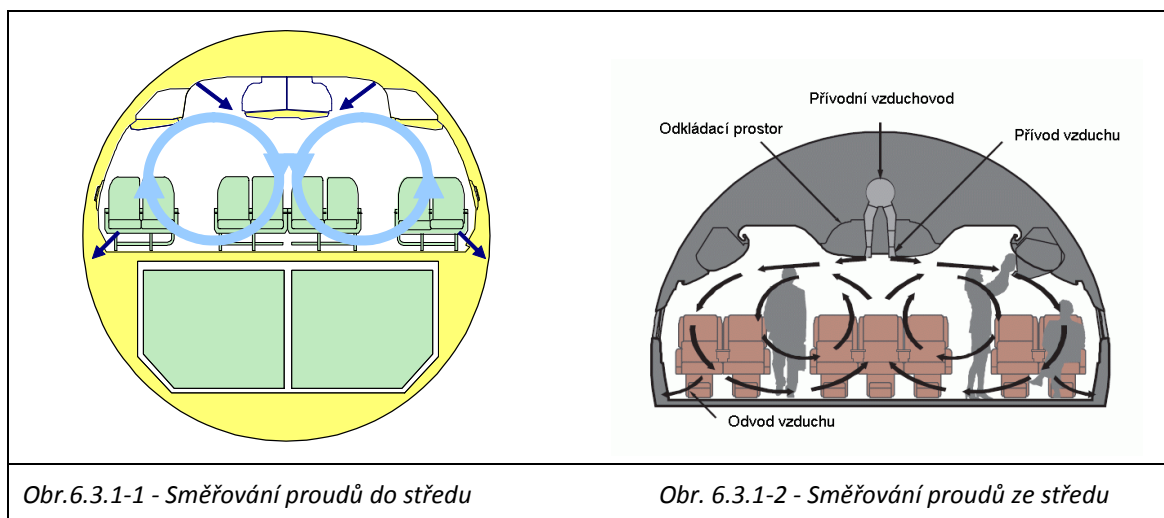
- Dobré provětrání a vytápění/chlazení celého prostoru kabiny. (VAN BUGGENHOUT, a další, 2006)
- Přenos tepla konvekcí na boční stěny kabiny má pozitivní vliv na tepelnou pohodu cestujících.

- Malé prostorové nároky, nízká hmotnost a cena koncových prvků distribučního systému.

Tento způsob větrání však přináší i některé zásadní nevýhody :

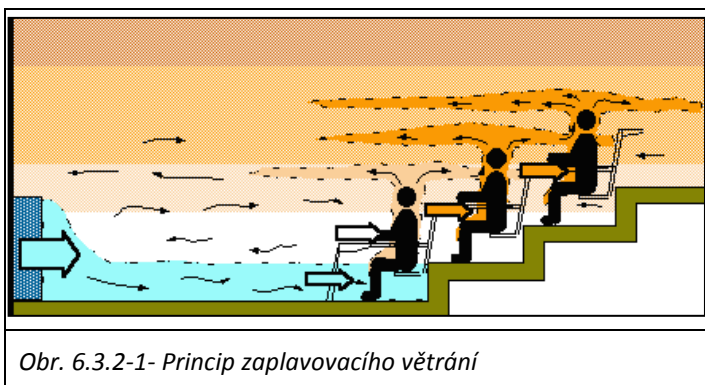
- Vysoké riziko obtěžování průvanem v důsledku vysoké rychlosti přiváděného vzduchu.
- Neustálé intenzivní promíchávání obsahu kabiny má za následek velice rychlé a snadné šíření škodlivin prostorem kabiny.
- Stejná teplota vzduchu pro celou zónu, nemožnost individuální regulace teploty.

Částečná personalizace větrání a regulace teploty je u většiny současných letadel umožněna doplňkovými větracími výstky, které jsou umístěny na spodní straně úložného zavazadlového prostoru nad sedadly. Tyto výstky umožňují individuální nastavení průtoku a směru proudu vzduchu, který proudí především kolem hlavy a horní části těla (NABBOUH, 2002). Vzduchovod individuálních výstek je připojen na hlavní distribuční vzduchovod (více viz kapitola 6.3.4). Teplota přiváděného vzduchu je pro všechny výstky v jedné zóně stejná.



6.3.2 Zaplavovací větrání (Displacement ventilation)

Tento způsob distribuce větracího vzduchu je založen na využití principu teplotní stratifikace, která je důsledkem změny hustoty plynů v závislosti na teplotě. Protože teplotní stratifikace je možná pouze v prostředí s převažujícími vztakovými silami musí být čerstvý vzduch přiváděn nízkými rychlostmi (JIANG, a další, 1992), (SKISTAD, a další, 2002). Z tohoto důvodu se pro přívod

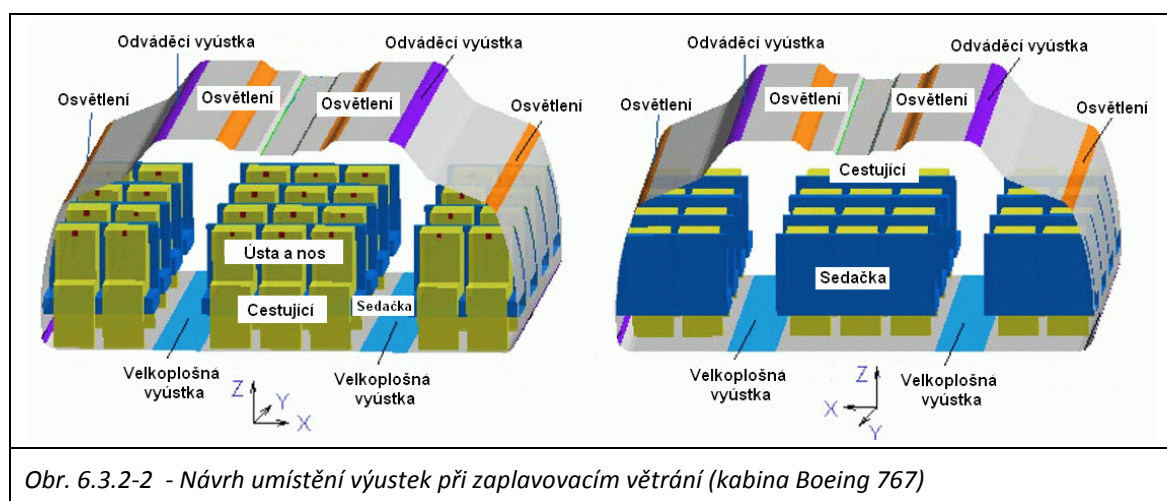


čerstvého vzduchu požívají velkoplošné koncové prvky (viz). Výstupní rychlost větracího vzduchu je cca do $0,2 \text{ m.s}^{-1}$. Přiváděný čerstvý vzduch je chladnější než vzduch ve větraném prostoru, a proto se šíří v blízkosti podlahy (viz Obr. 6.3.2-1). V místě pobytu osob je tento vzduch přisáván stoupavým proudem, který vzniká v okolí člověka jako důsledek přirozené konvekce. Proud stoupá ke stropu větraného prostoru spolu s vydechovaným vzduchem a dalšími škodlivinami (např. oděry). V blízkosti stropu je pak umístěna odváděcí výustka. Zaplavovací větrání má tyto zásadní výhody (VAN BUGGENHOUT, a další, 2006)

- Velká efektivita větrání, nižší nároky na množství přiváděného vzduchu.
- Nízké rychlosti proudění vzduchu \Rightarrow nízké obtěžování průvanem.
- Dobrá možnost kontroly šíření škodlivin ve větraném prostoru.

Nevýhody zaplavovacího větrání.

- Velké prostorové nároky koncových prvků.
- Omezení použití jen na specifické případy (nízké rychlosti, rozdíl teplot).
- Nebezpečí vzniku tepelného diskomfortu a průvanu v blízkosti podlahy.



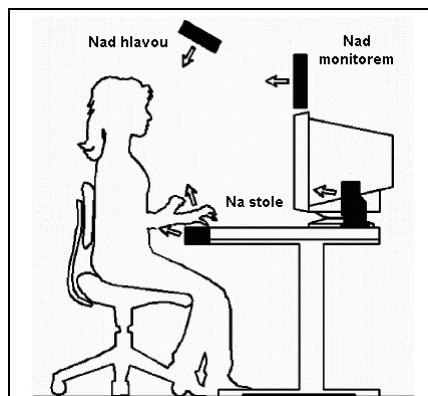
Obr. 6.3.2-2 - Návrh umístění výustek při zaplavovacím větrání (kabina Boeing 767)

Myšlenka využití tohoto způsobu větrání v kabinách dopravních letadel je relativně nová. To je i hlavním důvodem proč větrací systémy se zaplavovacím principem nejsou dosud aplikovány v žádném běžně provozovaném komerčním letadle. Možnost prostorového umístění přiváděcích výustek při tomto způsobu větrání je zobrazena na obrázku 6.3.2-2.

6.3.3 Lokální větrání (Personalized ventilation)

Tento způsob distribuce větracího vzduchu je založen na principu přívodu čerstvého větracího vzduchu bezprostředně do dýchací zóny osob pobývajících ve větraném prostoru (viz Obr. 6.3.3-1), což umožňuje zajistit dostatečné větrání a čistotu vzduchu s nižšími nároky na množství přiváděného čerstvého vzduchu. Tento princip také umožňuje individuální regulaci množství přiváděného vzduchu a nastavení směru výstupního proudu z výustky.

Výstky přivádějící čerstvý vzduch musí být umístěny v blízkosti horní poloviny těla a proud vzduchu musí být směřován tak, aby směřoval k obličeji. Dále musí mít proud vzduchu takovou rychlost, aby měl dostatečnou hybnost k narušení stoupavého proudu vznikajícího v blízkosti lidského těla v důsledku přirozené konvekce (v dostupné literatuře je uváděna výstupní rychlost z výstky $0,35 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ (ZHANG, a další, 2006)) (viz Obr. 6.3.3-2).



Obr. 6.3.3-1 - Možnosti umístění výstek v kanceláři

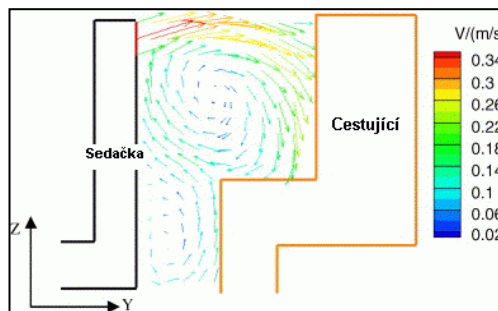
Základní výhody tohoto způsobu uspořádání tedy jsou:

- Zajištění dostatečného větrání a čistoty vzduchu s nižšími nároky na množství přiváděného čerstvého vzduchu.
- Vysoká efektivita větrání, možnost individuální regulace.
- Nízké promíchávání a směšování celkového objemu větraného prostoru.

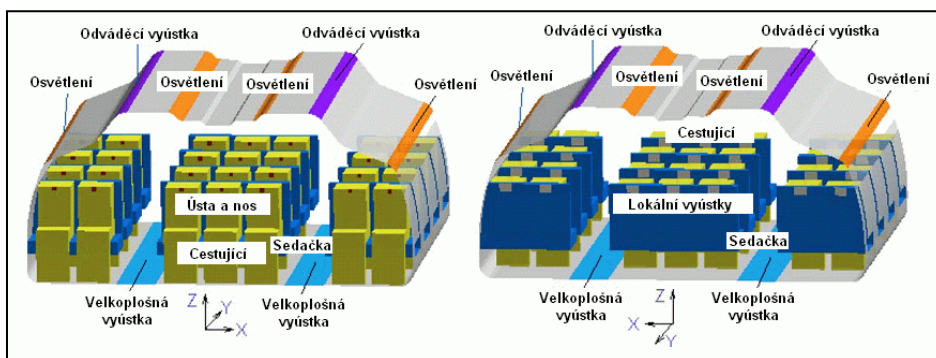
Nevýhody takového uspořádání jsou především

- Složitost systému, vyšší investiční náklady, náklady na údržbu.
- Přívod čerstvého vzduchu jen do přesně vymezeného prostoru.
- Množství vzduchu přiváděného individuálními výstkami není schopno zajistit teplovzdušné vytápění prostoru. Přívod vzduchu pro vytápění musí být realizován jinými koncovými prvky.

V oblasti aplikace lokálního větrání, v kabinách současných dopravních letadel, je situace obdobná jako u větrání zaplavovacího. Z toho důvodu není větrací systém s lokálním přívodem čerstvého vzduchu dosud instalován v žádném běžně provozovaném komerčním letadle. Možnost prostorového umístění přiváděcích výstek při tomto způsobu větrání je zobrazena na Obr. 6.3.3-3 (lokální větrací výstky jsou součástí sedaček, velkoplošné výstky jsou instalovány v podlaze).



Obr. 6.3.3-2 - Proudové pole v blízkosti cestujícího při lokálním větrání



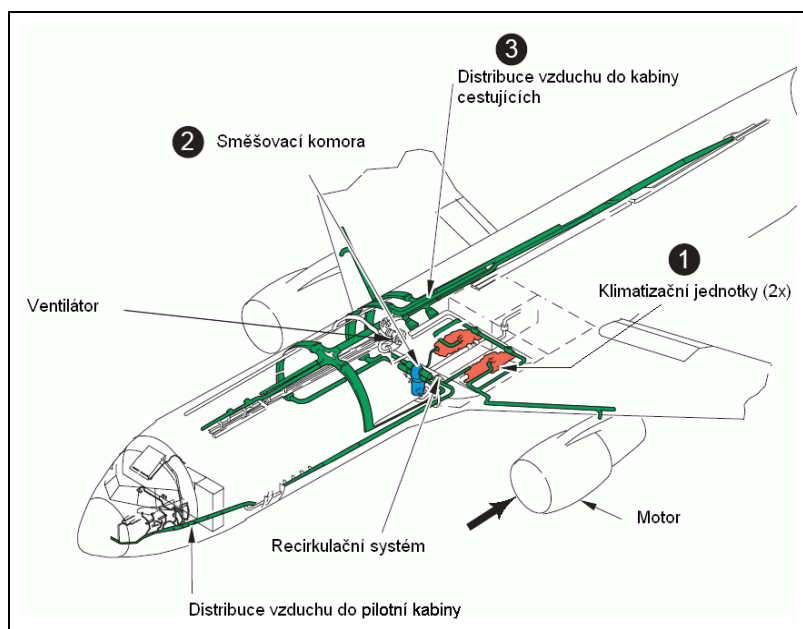
Obr. 6.3.3-3 - Návrh umístění výstek pro lokální větrání (kabina Boeing 767)

6.3.4 Síť distribučních vzduchovodů

Síť distribučních vzduchovodů je část ECS, prostřednictvím které se realizuje přeprava a rozvod vzduchu od klimatizační jednotky ke koncovým prvkům. Prostorové uspořádání, rozměry a tvar prvků sítě distribučních vzduchovodů je vždy přizpůsoben konkrétnímu typu letadla a konkrétnímu vybavení kabiny. Na obrázku 6.3.4-1 je znázorněna síť vzduchovodů v kabině letadla Boeing 767.

Ze směšovací komory (pozice 2) je vzduch přiváděn stoupacími vzduchovody do hlavních vzduchovodů ve stropní části kabiny (pozice 3). Z těchto vzduchovodů jsou vyvedeny odbočky k jednotlivým skupinám výustek (viz obr. 6.4-1), které přivádí vzduch do prostoru kabiny. Síť distribučních vzduchovodů je vždy přizpůsobena konkrétnímu rozvržení cestovních tříd v kabině letadla, protože do každé části kabiny odpovídající určité třídě je potřeba přivádět vzduch s jinou teplotu. Tyto části kabiny jsou označovány jako zóny a každá zóna má individuální nastavení a regulaci teploty vzduchu.

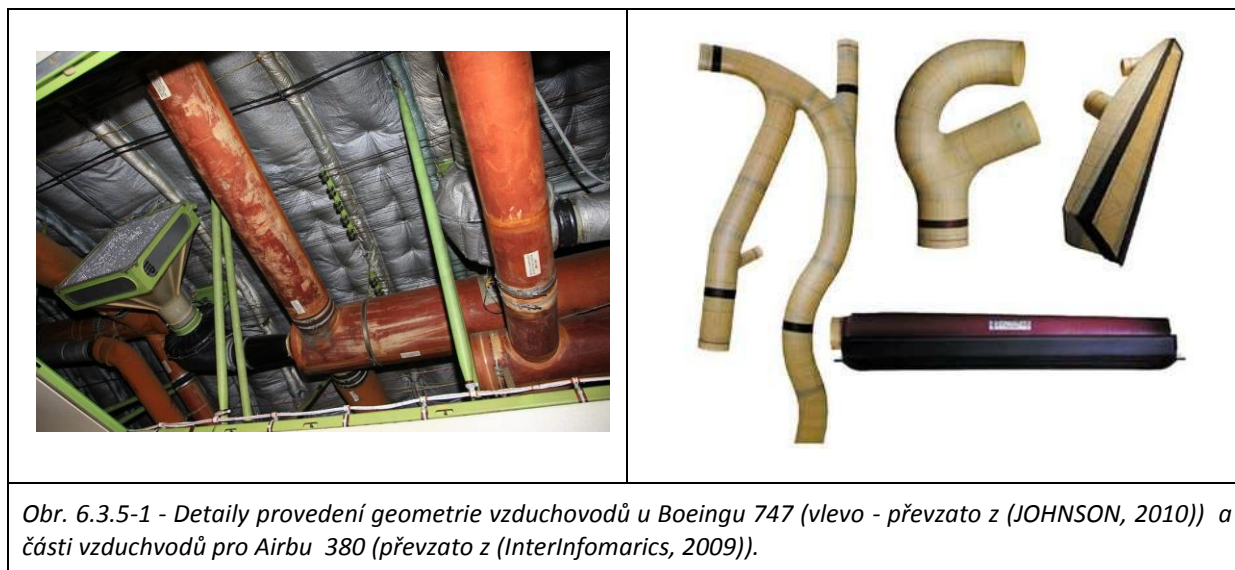
Tvar a materiál vzduchovodu má vliv na tvar rychlostního profilu ve vzduchovodu. Tvar rychlostního profilu ovlivňuje rychlostní pole generované koncovými prvky (výustkami). Tento fakt je nezbytné zohlednit při laboratorních měřeních i modelování (CFD) úloh souvisejících s výzkumem proudění a distribuce vzduchu ve větraných prostorech (HUO, a další, 2000), (KUZNIK, a další, 2005), (SKOVGAARD, a další, 1991).



Obr.6.3.4-1 - Distribuční síť vzduchovodů (zeleně) Boeing 767

6.3.5 Profily vzduchovodů

Tvary a profily vzduchovodů jsou většinou přizpůsobeny prostorovým možnostem těch částí letadla, v kterých jsou vedeny. Lze říci, že tvary vzduchovodů u velkých letadel byl dříve navrhovány na základě minimalizace celkového průřezu a ne na základě optimalizace rychlosti proudění či tlakových ztrát. Tento případ ilustruje obrázek 6.3.5-1, na kterém je zobrazeno vedení vzduchovodů ve stropní části Boeingu 747, jehož konstrukce pochází z šedesátých letech dvacátého století. U nově projektovaných letadel, jako je například Airbus 380, je situace s nástupem CAD systémů jiná a optimalizaci tvarů vzduchovodů je věnována větší pozornost (viz Obr. 6.3.5-1). Problematika optimalizace tvarů a průřezů vzduchovodů u malých letadel je stále spíše okrajovou záležitostí. Vzduchovody jsou většinou řešeny flexibilním vroubkovanými hadicemi, jejichž tlaková ztráta je značná a průřez je často navrhován pouze na základě předešlých řešení.



6.4 Koncové prvky

Jednou z hlavních součástí větracího systému, ovlivňující proudění vzduchu ve větraném prostoru, jsou koncové prvky (výustky). Jejich konstrukce a nastavení má hlavní vliv na tvar proudového pole, dosahy proudů a výměnu vzduchu ve větraném prostoru. Konstrukci a funkci koncových prvků ovlivňuje především způsob distribuce vzduchu, pro který bude koncový prvek určen. Výběr způsobu distribuce vzduchu pak ovlivňují především požadavky na funkci a účel větracího systému. Výustky lze třídit podle různých kritérií a parametrů. Dle plochy výustky a výstupní rychlosti přiváděného vzduchu lze rozlišovat:

- velkoplošné výustky (Obr. 6.4.1-1)
-
- výustky s malou plochou

Dle tvaru výustky:

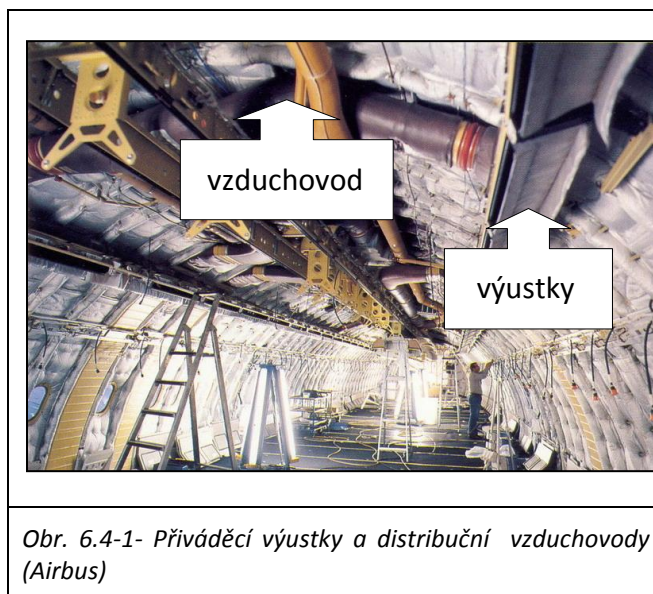
- obdélníkové
- kruhové
- štěrbinové (Obr. 6.4-1)

Dle funkce:

- přiváděcí
- odváděcí

Dle možnosti změny nastavení:

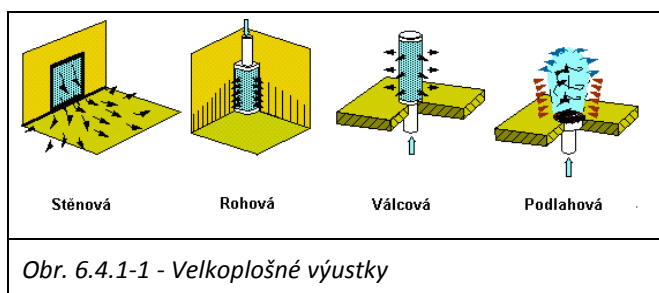
- fixní
- nastavitelné



V současných letadlech se používá prakticky výhradně celkového větrání. Větrací vzduch je do kabiny přiváděn hlavními šterbinovými výstky, které jsou umístěny v blízkosti stropu (viz Obr. 6.4-1) a dále také kruhovými individuálními výstky umístěnými nad sedadly cestujících (viz obr. 6.4.2-1).

6.4.1 Hlavní výstky

Hlavní, fixní, přiváděcí výstky přivádí převážnou část z celkového objemu větracího vzduchu. Toto množství zajišťuje nejen větrání kabiny, ale především teplovzdušné vytápění či chlazení. Pro jiné způsoby distribuce vzduchu do prostoru kabiny (viz kapitola 6.3) je zapotřebí zcela jiných výstek než jaké jsou dnes používány. Konstrukce těchto výstek musí



odpovídat náročným podmínkám, kterým budou výstky vystaveny v běžném leteckém provozu. Nároky na použité materiály, spolehlivost, čistitelnost a hmotnost jsou u těchto aplikací z provozních a bezpečnostních důvodů značné.

6.4.2 Doplnkové výstky

Individuální, nastavitelné, doplňkové kruhové výstky přivádí dodatečné množství vzduchu přímo do blízkosti hlavy a horní části trupu každého cestujícího. Ten si pak může individuálně regulovat směr a průtok vzduchu výstky. Do výstek je obvykle dodáván



filtrovaný oběhový vzduch, jehož teplota není nijak upravena. V případě malých letadel je zdrojem vzduchu odbočka z hlavního výstupního vzduchovodu klimatizační jednotky (v případě přetlakové kabiny), nebo je vzduch přiváděn z okolí pomocí NACA vstupu. Vzhledem k malému průřezu výstek je výstupní rychlost primárního proudu vysoká a jak vyplývá z šetření v rámci projektů CabinAir a iSPACE, většina cestujících výstky v průběhu letu zcela zavírá především z důvodu obtěžování

průvanem. Jiná je však situace v době nástupu do letadla či vzletu, kdy jsou v doplňkové výstky využívány častěji, především z důvodů "osvěžení" či k snížení příznaků nevolnosti. V rámci projektu iSPACE, v kterém je autor zapojen, jsou zkoumány možnosti individuálního nastavení a řízení prostředí na úrovni jednotlivých sedadel, kdy se využívá doplňkových výstek pro distribuci vzduchu s parametry nastavenými cestujícími. Je zkoumána celá řada typů a umístění výstek ovšem pouze v rámci sedadel první a obchodní třídy. Systémy pro individuální úpravu prostředí jsou totiž velice finančně nákladné jak při realizaci tak při provoz (energie, údržba atd.). V době zpracování disertační práce však byl projekt pouze v polovině plánované doby a konečné výsledky tak nebyly k dispozici.

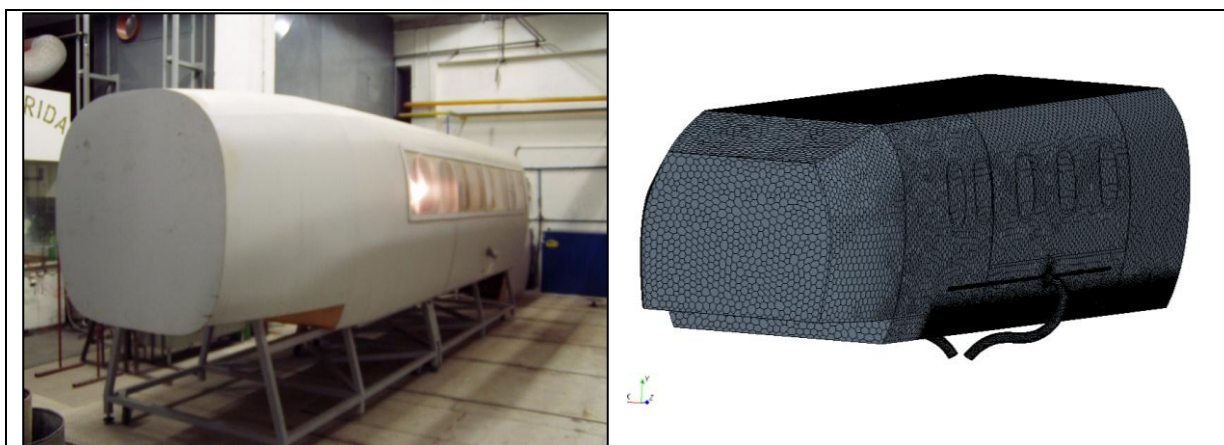
7 CFD A JEJÍ VYUŽITÍ PRO SIMULACE PROSTŘEDÍ V KABINÁCH

Jako nástroj pro výzkum vlivu distribuce vzduchu na parametry mikroklimatu v kabině letounu, byla zvolena metoda výpočtové mechaniky tekutin - CFD (Computational fluid dynamic, dále jen CFD). Tato metoda byla zvolena především z důvodu možnosti prověřit různé typy distribučních systémů a jejich geometrické uspořádání bez nutnosti použití časově i finančně nákladných laboratorních modelů. Předností této metody je také to, že poskytuje detailní data o teplotních a proudových polích v kabině, díky jejichž znalosti lze predikovat kvality mikroklimatu a tepelnou pohodu.

Jak již bylo předesláno, práce se nezabývá blíže vytvářením modelů či programových kódů řešičů CFD softwarů, ale využívá CFD pouze jako nástroj pro experimenty in silico, proto neobsahují následující kapitoly podrobný teoretický popis metody, ale spíše praktické zkušenosti a ověřené postupy práce s metodou.

7.1 Využití CFD pro simulaci parametrů vnitřního prostředí

Při numerickém modelování proudění a přenosu tepla prostředky výpočtové mechaniky tekutin (CFD) je výpočtová oblast rozdělena do sítě relativně malých kontrolních objemů, které se obvykle nazývají výpočtové buňky a tvoří síť výpočtových buněk (v ANJ mesh) (viz Obr. 7.1-1). Pro každou buňku jsou diskretizačními rovnicemi vyjádřeny základní zákony zachování hmoty, hybnosti či energie (podrobně viz (PATANKAR, 1980), (MALALASEKERA, a další, 2007) (WONG, et al., 2003) . Jejich řešením získáme - ve spojení s vhodnými okrajovými podmínkami - prostorové a časové rozložení příslušných veličin (teploty, rychlosti proudění atd.). Výhodou je, že není potřeba zadávat žádné speciální vztahy a vazby mezi částmi modelu, ovšem je nezbytné správně specifikovat okrajové podmínky, na nichž řešení závisí (např. teplotu okolí, vstupní rychlost, energetické zisky apod.) (JAROŠ, a další, 2002).



Obr. 7.1-1 Reálná maketa kabiny letadla a její geometrický model rozdělený do sítě s 3,5 milionu výpočtových buněk

Typ okrajové podmínky závisí na fenoménu, který má daná okrajová podmínka reprezentovat. V technice prostředí se povětšinou simulují fenomény a podmínky vyskytující se v obytných prostorách budov, pracovním prostředí, v kabinách dopravních prostředků či

jiných specifických prostorách, v kterých je nezbytné udržovat parametry prostředí v určeném rozsahu. V současných softwarech existuje celá řada typů okrajových podmínek, které lze většinou zařadit do některé z následně uvedených skupin, ale jichž označení se liší podle výrobce a typu použitého software. Nejčastěji používané skupiny typů okrajových podmínek jsou:

Okrajová podmínka typu stěna (wall) - definuje zpravidla vnější, ale i vnitřní okraje/ohraničení oblasti. Tepelné vlastnosti stěny mohou být definovány několika způsoby:

- adiabatická stěna – dokonale izolovaná stěna, tepelný tok stěnou je roven nule
- teplota vnějšího povrchu stěny a tepelný odpor/vodivost stěny
- tepelným tokem přes stěnu

Pro tento typ podmínky lze dále většinou zadat zdroj hybnosti na povrchu, drsnost povrchu a radiační vlastnosti stěny.

Tlaková okrajová podmínka (pressure) - definuje většinou volný okraj domény, nebo otvor na okraji oblasti. Je vhodná v případě, že není definována hodnota vstupní či výstupní rychlosti, kterou je nezbytné zadat u podmínek typu vstup a výstup. Umožňuje současný vstup a výstup tekutiny v různých částech otvoru a mimo tlaku lze zadat radiační vlastnosti otvoru a parametry pro model turbulence.

Okrajová podmínka typu přepážka (baffle) - používá se především pro definování tenkých stěn uvnitř oblasti, jejichž tloušťka je zanedbatelná (např. prvky z tenkého kovového plechu). Parametry jsou obdobné jako u okrajové podmínky stěna, lze je však zadat individuálně pro každou stranu přepážky.

Okrajová podmínka typu vstup (inlet) - definuje rychlost vstupujícího proudu do oblasti, teplotu proudícího média, radiační vlastnosti vstupu a parametry pro model turbulence.

Okrajová podmínka typu výstup (outlet) - definuje výstupní proud z oblasti za předpokladu, že tekutina proudí ve všech místech okrajové podmínky pouze jedním směrem. Specifikovat lze poměr, kolik tekutiny opouští doménu místem aplikace OP vzhledem k přivedenému množství média, nebo konkrétní hodnotu hmotnostního toku média.

Periodická okrajová podmínka (periodic) - umožňuje zjednodušit úlohy jejichž geometrie se skládá z geometricky stejných opakujících se úseků. Typickým příkladem je proudění v kanále, kdy je na vstupu a výstup použit tento typ podmínky a z pohledu řešení se pak modelovaný kanál jeví jako nekonečný. Aplikace podmínky má celou řadu nastavení, která zajišťují korektní vyjádření fyzikálních podmínek v simulaci. Při simulaci kanálu je například nezbytné zajistit výpočet správného tlakového spádu v modelovaném úseku, v jehož důsledku dochází k proudění média.

Symetrická okrajová podmínka (symmetry) - umožňuje zjednodušit úlohy v nichž se vyskytují geometrické či fyzikální symetrie. Klasickým příkladem využití této podmínky je simulace chladícího žebra s předepsaným tokem na patě žebra.

Ostatní typy okrajových podmínek - např. free stream, stagnation inlet, fully developed, internal interface atd., avšak jejich využití v oblasti simulací techniky prostředí je spíše omezené.

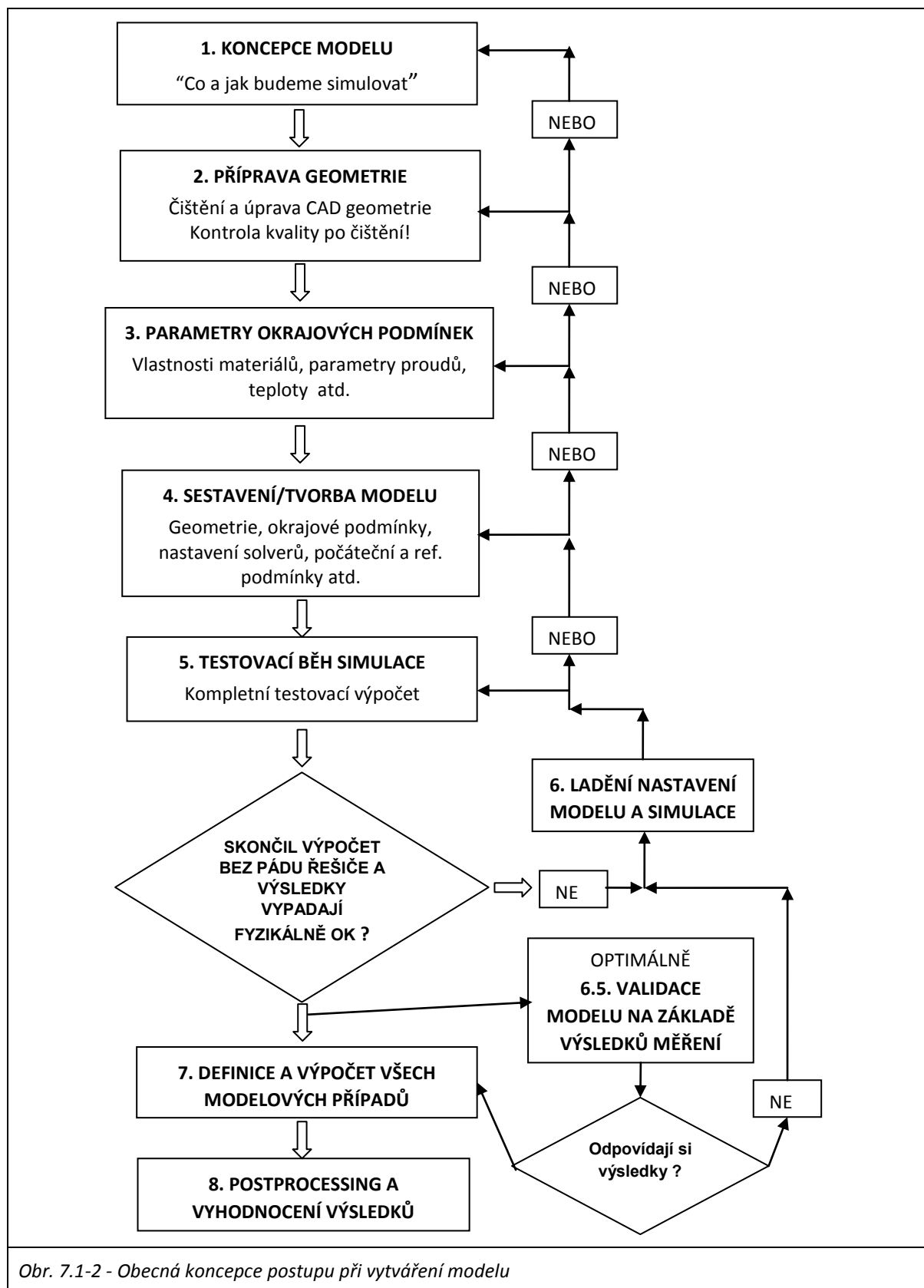
Z výše popsaných vlastností CFD metody plynou základní výhody a omezení jejího hlavního uplatnění. Metoda je schopna poskytnout velmi detailní výsledky rozložení modelovaných veličin v prostoru a čase, avšak za cenu značné hardwarové náročnosti a časové náročnosti tvorby samotného modelu. Metoda klade také značné nároky na pracovníky a inženýry, kteří ji používají a to jak z pohledu složitosti softwarových balíčků pro tvorbu a řešení modelů, tak z hlediska znalostí fyzikální podstaty modelovaných jevů a praktických zkušeností s využitím používaných softwarů.

Sestavení modelu

Ve většině odborných publikací na téma CFD jsou široce popisovány teoretické základy metody CFD, ale povětšinou je jen velice málo popisu věnováno samotnému postupu vytváření modelů pro současné hojně využívané CFD softwary jako je Star-CCM+, Ansys/CFX či OpenFOAM (světlou výjimkou je (MALALASEKERA, a další, 2007)). Autor prošel při osvojování si dovednosti vytváření CFD modelů celou řadou pokusů a omylů z nichž nabyt řadu zkušeností, jejichž výsledek lze shrnout do postupu zobrazeného jako vývojový diagram na obrázku 7.1-2. Pole diagramu představují jednotlivé činnosti, které je nezbytné provést při práci na CFD simulaci konkrétního problému. Šipky spojující jednotlivá okénka pak naznačují hlavní možnosti posloupnosti kroků a činností.

Pokud je to z hlediska povahy problému a časových a finančních hledisek možné, měla by pro kompletním vytvoření modelu a testovacích simulací následovat fáze validace výsledků modelu. Zvláště pak u nových či nevyzkoušených typů problémů je tento přístup zcela nezbytný, neboť většinou není k dispozici žádné jiné vodítko naznačující správnost získaných výsledků a je zjevné, že ze špatných výsledků nelze vyvodit správné závěry a doporučení. Validace modelů tedy především odhalí míru shody predikce modelu s reálnými jevy a pomůže lépe vytyčit oblasti použitelnosti/nepoužitelnosti vytvořeného modelu. Nezřídka pomůže validace také odhalit nepřesná či chybná nastavení simulace nebo okrajových podmínek. Bohužel však podle zkušeností autora, je tato fáze vývoje modelu většinou vynechávána s tím, že je příliš finančně nákladná nebo příliš časově náročná. Opodstatnění takového konstatování je však pouze u problémů a úloh u nichž by realizace měření nebyla možná z hlediska rozměrnosti konstrukce (např. odlučování popílků v elektrárně) či nemožnosti provedení měření bez ovlivnění zkoumaného jevu. Často je také důvodem vynechání validace modelu fakt, že studie je vytvářena na zakázku objednatele, který vyžaduje velmi krátkou dodací lhůtu.

Validace by také měla být opakovaně provedena i u již validovaného modelu, pokud je přecházeno na novou verzi simulačního softwaru. Zvláště v posledních letech je vývoj v této oblasti doslova překotný a funkcionality jednotlivých verzí se může zásadně lišit v důsledku toho jak jsou postupně opravovány skryté chyby či rozšiřovány možnosti kódu programu.



Obr. 7.1-2 - Obecná koncepce postupu při vytváření modelu

7.2 Modelování turbulence

Ve většině případů simulací v oboru techniky prostředí se vyskytuje proudění, které je vzhledem k rychlosti (velikostem Reynoldsova čísla) a povaze proudu turbulentní. Pojmem turbulence se obecně označuje takovém proudění vazké tekutiny, při kterém dochází k vzájemnému složitému "promíchání" proudnic, přičemž částice vykonávají kromě translačního pohybu i komplexní vlastní pohyb, který vede k vytváření vírů. Rychlosti částic v různých částech domény se mění, což znamená, že proudění je nestacionární. Ačkoliv je příčina a vznik turbulence stále částečně nevyřešenou otázkou, existuje celá řada modelů, které se její vznik a účinky na pohyb tekutiny snaží modelovat. Postupy se především liší přístupy k popisu turbulence a výpočtovou náročností.

- RANS - Reynolds-averaged Navier-Stokes - modely založené na řešení průměrovaných Navier Stokesových rovnic
- LES - Large Eddy Simulation - metoda řešící přímo pouze velké víry nebo velmi velké víry, přičemž vliv/efekt malých vírů je modelován subgridním modelem
- DNS - Direct Numeric Simulation - metoda založená na přímém řešení všech měřítek a velikostí vírů.

Přímá numerické simulace (DNS) a metoda simulace velkých vírů (LES), jsou metody které přímo popisují a simulují turbulenci na téměř všech měřítcích velikosti vírů. DNS simuluje všechna měřítka turbulence na nejvyšší možné úrovni detailů, ovšem za cenu, i v dnešní době, enormních hardwarových nároků. LES metoda přímo řeší jen velká nebo velmi velká (VLE) měřítka turbulence. Z uvedených metod je pak nejjednodušší metoda založená na řešení průměrovaných Navier Stokesových rovnic (RANS), které řeší časově průměrované rovnice s cílem modelovat všechna měřítka turbulence. Značnou nevýhodou metod DNS a LES je, že jejich použitelnost je zatím limitována jen na geometricky jednoduché úlohy jako je např. proudění v kanále. I tyto jednoduché úlohy však vyžadují velice jemné síť buněk, což vede ke krátkým časovým krokům při řešení (typicky 10^{-4} sekundy a méně). Pro využití v úlohách spojených s technikou prostředí je tedy zatím využitelná pouze metoda RANS, která při správné volbě modelu dovede predikovat vliv turbulence s dostatečnou přesností (NILSSON, 2004).

Při projektech kterých se autor práce účastnil, a které se povětšinou zabývali simulací vnitřního prostředí v kabinách dopravních prostředků se osvědčilo využití RANS modelu označovaného jako k- ω SST (blíže viz (MENTER, a další, 2003)). Ve spojení s ošetřením přístěnné oblasti na základě velikosti y^+ vykazuje tento model robustní chování a je přímo navržen pro úlohy, v kterých se vyskytuje záporný tlakový gradient v mezní vrstvě a také je schopen s relativně vysokou přesností postihnout i rozpad a šíření proudu při volném výtoku do prostoru s nízkými rychlostmi. Ostatní RANS modely jsou většinou navrženy a optimalizovány na příliš úzký rozsah Reynoldsových čísel a tím pádem i rychlostí. U modelování vnitřního prostředí kabin dopravních prostředků však typicky dochází k situacím při nichž je v přívodních vzduchovodech rychlost proudění vzduchu rovna několika metrům za sekundu, zatím co v prostoru kabiny klesá až o dva řády.

7.3 Modelování přenosu tepla konvekcí a radiací

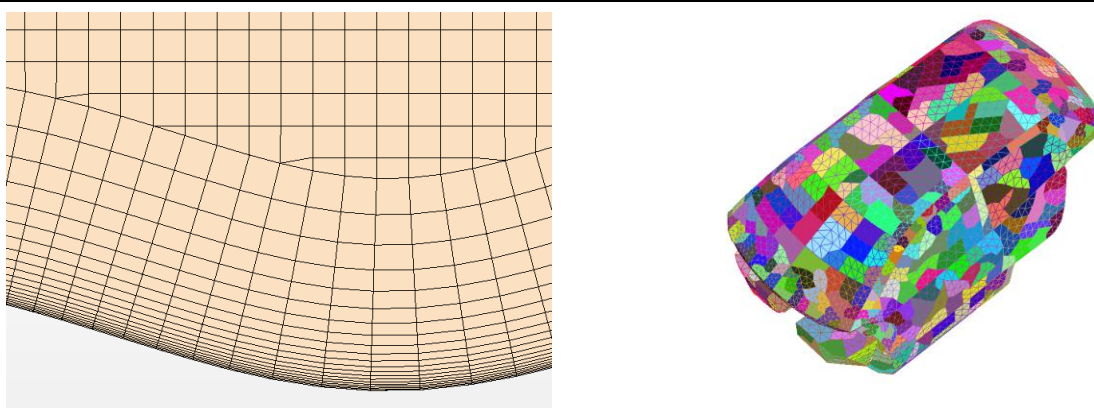
Zcela nezbytnou součástí při modelování kvality vnitřního mikroklimatu a tepelné pohody je korektní modelování přenosu tepla konvekcí a radiací. Přenos tepla konvekcí je modelován na základě interakce proudícího média a okrajových podmínek typu stěna či přepážka, přenos tepla radiací je modelován samostatným modelem.

Přenos tepla konvekcí

V simulacích pro techniku prostředí je velice důležitá správná predikce tepelného toku konvekcí mezi povrchem a okolní proudící tekutinou. Neboť přesnost predikce závisí na přesnosti simulace mezní vrstvy, je doporučeno využívat při těchto druhích simulace ošetření přístěnné oblasti pro nízká Reynoldsova čísla ($y^+ \approx 1$) (KOK, a další, 2005) (PENNECOT, a další, 2005). To vyžaduje vytvoření jemné sítě v blízkosti stěny, jejíž výška odpovídá tloušťce mezní vrstvy a typicky je při nerovnoměrném dělení tvořena 12ti až 20ti vrstvami buněk (viz Obr. 7.3-1).

Přenos tepla radiací

Prostřednictvím radiace je přenášena významná část tepla z povrchu těla člověka (např. v simulacích v kapitole 11 je při venkovní teplotě -25 °C přenášeno z povrchu figuríny $41,7\text{ W/m}^2$ (64,5%) tepla radiací a $22,9\text{ W/m}^2$ (35,5%) konvekcí) a střední radiační teplota okolí je jedním z významných parametrů pro určení tepelné pohody. V CFD se obvykle využívá model založený na výpočtu přenosu tepla radiací mezi definovanými ploškami na okrajových podmínkách domény. Princip činnosti vyplývá z anglického názvu surface-to-surface model, a spočívá v iterativním výpočtu přenosu tepla mezi definovanými ploškami (tzv. patches viz Obr. 7.3-1) s definovanými normálami, přičemž intenzita přenosu je úměrná úhlovým faktorům, rozdílu povrchových teplot a emisivitám povrchů. Protože ve většině simulací techniky prostředí se vyskytují teploty v rozmezí cca 240-330 K, je možné s dostatečnou přesností zúžit simulaci přenosu tepla radiací pouze na dlouhovlnnou oblast. Pokud je v modelu nutné uvažovat i energetické účinky solární radiace, je výpočet většinou řešen specializovaným modelem.



Obr. 7.3-1 - Síť buněk v blízkosti stěny pro využití ošetření přístěnné oblasti pro malá Reynoldsova čísla a model kabiny automobilu s ukázkou rozdělení povrchové sítě do plošek/patch(ů) pro model přenosu tepla radiací.

7.4 Modelování kvality větrání a vlhkosti

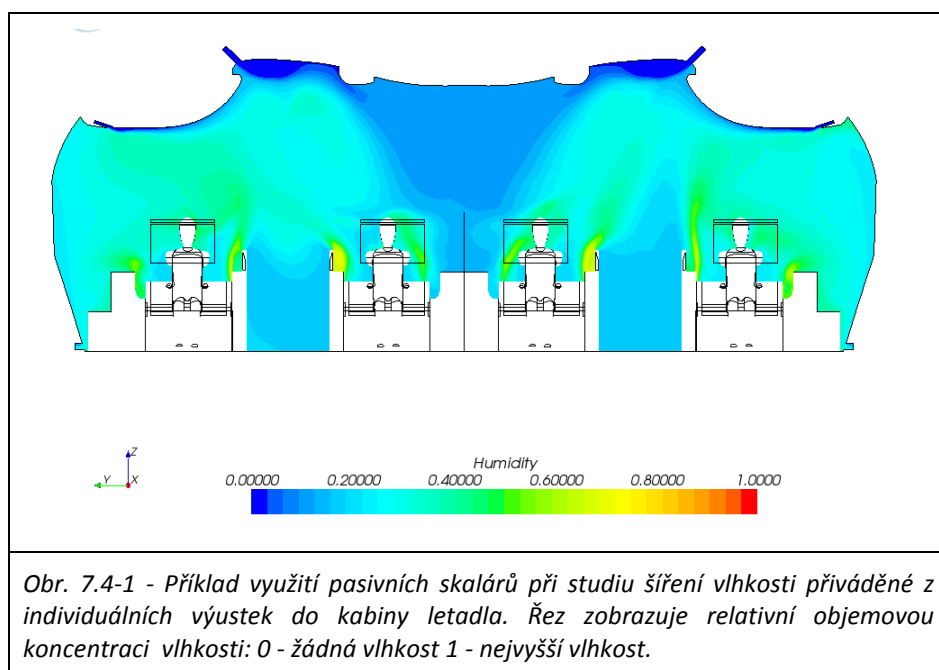
Kvalita větrání je určována na základě indexů uvedených v kapitole 4.5. Výchozím indexem z kterého jsou odvozeny ostatní indexy kvality větrání, je index Stáří vzduchu. V CFD se obvykle modeluje jako pasivní skalár, což znamená, že šíření skaláru v doméně nijak neovlivňuje přenosové rovnice ostatních simulovaných veličin a nevstupuje s ostatními simulovanými složkami do interakce (čili jeho přítomnost v doméně je zcela pasivní).

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho t_B) + \frac{\partial}{\partial x_j}(\rho w_j t_B) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\Gamma_{t_B} \frac{\partial}{\partial x_j} \right) + \rho \quad (7.1)$$

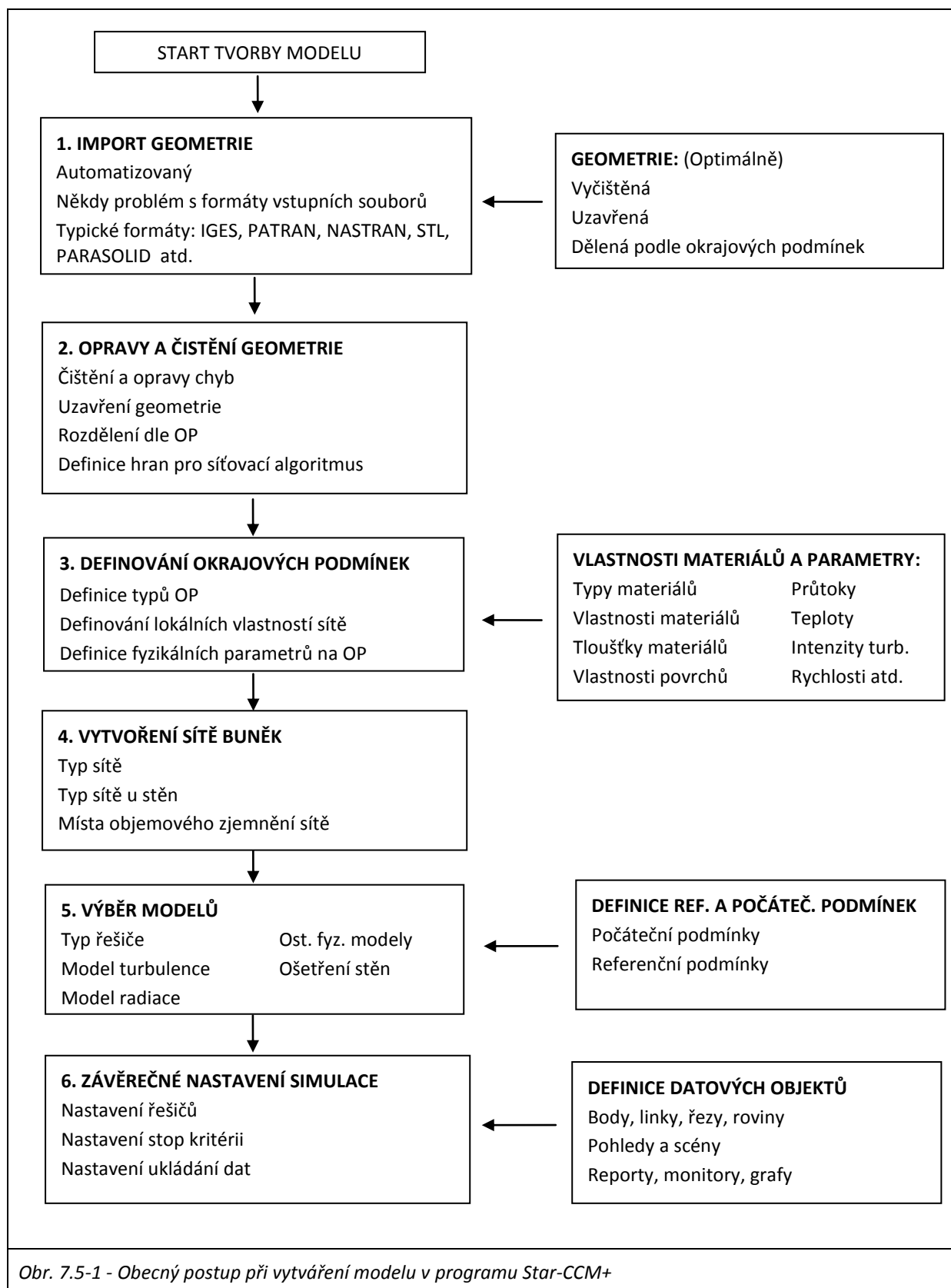
Transport skaláru doménou se řídí transportní rovnicí 7.1 při následujících podmínkách na hranicích domény:

- $t_B = 0$ na okrajových podmínkách typu vstup/inlet,
- $\frac{\partial t_B}{\partial x_j} = 0$ na okrajových podmínkách typu výstup (outlet) nebo stěna (wall) (KAMELL, et al., 2003), (LI, et al., 1996)).
- Zdrojovým členem v rovnici 7.1 je hustota vzduchu.

Obdobným způsobem může být například simulováno i šíření vlhkosti přiváděné z distribučních výustek do větraného prostoru (viz Obr. 7.4-1), nebo například škodlivin vznikající ze zdrojů ve vnitřním prostředí. V tomto případě je zdrojový člen v rovnici 7.1 roven 0 a zdroj je předepsán na okrajovou podmínku typu inlet (v případě simulace šíření vlhkosti) či je zdroj předepsán jako bodový do prostoru domény.



7.5 Postupy a metodiky pro tvorbu CFD modelů v software Star-CCM+



Na obrázku 7.5-1 je uveden vývojový diagram pro tvorbu CFD modelu v softwaru Star-CCM+. Číslovaná pole diagramu představují jednotlivé činnosti, které je nezbytné provést při tvorbě/sestavování CFD modelu konkrétního problému a šipky představují jejich vzájemnou posloupnost. Nečíslovaná pole obsahují doplňkové informace či vstupy pro jednotlivé fáze tvorby modelu. Některé činnosti jsou blíže popsány v následujících podkapitolách.

7.5.1 Vliv kvality vstupní geometrie a výpočtové sítě buněk

Protože výpočet řešených polí fyzikálních veličin je v CFD realizován v objemech vymezených buňkami, je pro správnou predikci pole zcela nezbytné, aby model obsahoval korektně definovanou a po stránce geometrie kvalitní síť výpočtových buněk. Dle zkušeností autora práce je nezbytné dodržet několik zásad, které jsou shrnuty v podkapitole a také je nutné neustále mít na paměti, že **na špatné síti nelze prakticky dosáhnout dobrých výsledků**.

Autorovy poznatky vycházejí především ze softwaru Star-CCM+ firmy ADAPCO, jehož součástí je i modul zvaný Geometry Repairer (opravář geometrie) pomocí jehož nástrojů lze všechny obvyklé topologické chyby detekovat a opravit.

Kontrola kvality geometrie a nejčastější topologické chyby:

Vstupní geometrie exportované z CAD systémů a následně pročištěné automatickými čistícím algoritmy obsahují velice často topologické chyby. Automatické nástroje pro čištění geometrii umožňují efektivně opravit snadno rozpoznatelné topologické chyby (např. špatný poměr stran buněk), ale komplikovanější problémy (např. propíchnutí či překrytí buněk) je

stále nebytné řešit tzv. ručním pročištěním a úpravou/opravou geometrie. Takový postup je sice velice časově náročný a finančně nákladný, ale stále je to jediný způsob jak vytvořit kvalitní vstupní geometrii, jenž je nezbytným základem pro tvorbu kvalitní sítě výpočtových buněk. Automatický algoritmus totiž "nezná" účel pročišťované geometrie a nemůže tak efektivně rozhodnout, které části jsou nadbytečné nebo, které hrany může spojit do jedné atd.

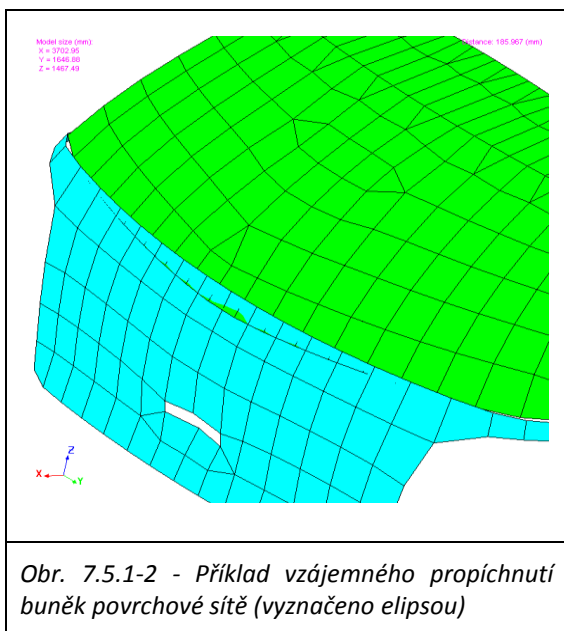
Vysoký poměr stran buňky:

Obr. 7.5.1-1 - Příliš velký poměr stran - fialově, vyznačený element měl poměr stran 90

Poměr šířky ku délce povrchové buňky by dle obecných doporučení neměl přesahovat hodnotu 10. Pokud je poměr vyšší způsobuje většinou buňka problémy při změně hustot povrchové sítě, zvláště pokud je-li jedna z jejích stran součástí hrany geometrie. Příklad povrchové buňky s příliš vysokým poměrem stran je uveden na obrázku 7.5.1-1 - buňka je obarvena fialově. Velkou část takových buněk je dnes možné opravit automaticky a síťovací

algoritmus je nahradí větším počtem buněk s odpovídající plochou a poměrem stran. Po přesíťování je však nezbytná kontrola kvality vzniklé sítě a popřípadě ruční oprava buněk. Zvláštní pozornost je potřeba věnovat geometriím, kde jsou na podlouhlá tělesa napojeny zaoblené tvary např. v této práci napojení oválných výustek na distribuční vzduchovody. Na takových místech obvykle v důsledku přítomnosti buněk s velmi vysokým poměrem stran, vzniká překrytí či propíchnutí buněk a je potřebné chybu opravit manuálně.

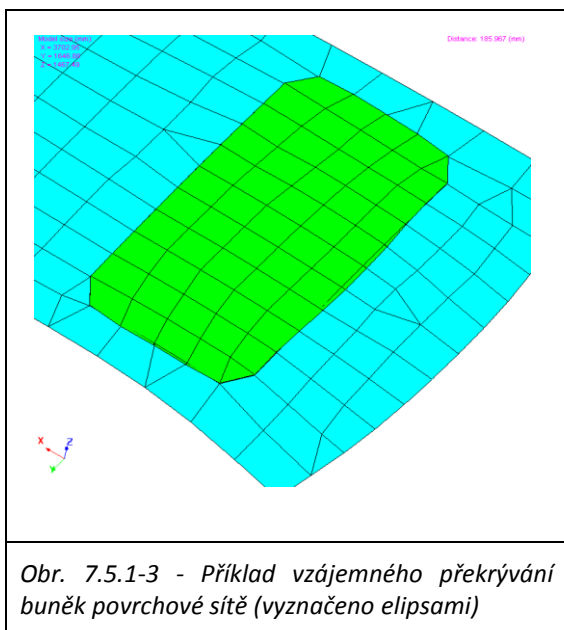
Vzájemné propíchnutí buněk:



Obr. 7.5.1-2 - Příklad vzájemného propíchnutí buněk povrchové sítě (vyznačeno elipsou)

Vzniká v případě, kdy body definující povrchovou buňku leží na protilehlých stranách jiné buňky. Plochy tvořící buňky se poté navzájem propichují popřípadě protínají. Situaci dobře ilustruje obrázek 7.5.1-2, který zobrazuje zadní části geometrie osobního automobilu a povrchové buňky reprezentující zadní sklo protínající se s buňkami reprezentujícími plech. Situaci obvykle lze řešit pouze manuální opravou sítě a to tak, že jsou body jedné plochy přesunuty na hranu plochy druhé a většinou jsou ještě následně sloučeny.

Překrývající se buňky a vícenásobné povrchy:



Obr. 7.5.1-3 - Příklad vzájemného překrývání buněk povrchové sítě (vyznačeno elipsami)

Chyba se vyskytuje velice často hlavně u geometrii jejichž zdrojem jsou výrobní 3D CAD modely (viz Obr. 7.5.1-3). U těchto modelů se obvykle pracuje s materiály konečných tloušťek, takže protilehlé strany plošných konstrukcí tvoří dvě plochy vzdálené většinou pouze na jednotky milimetrů. Takto zdvojené geometrie je po importu do CFD softwaru potřeba pročistit smazáním nadbytečných ploch. Obvykle opět nelze pročistění realizovat automaticky, neboť je třeba definovat, které plochy je třeba smazat a které mají být v modelu zachovány.

Hustota/detailnost povrchové sítě

Obr. 7.5.1-4 - Příklad různých hustot povrchové sítě na základě očekávaných gradientů polí a členitosti geometrie.

Musí odpovídat požadovanému rozlišení výsledků v blízkosti dané části modelu, členitosti geometrie modelu a musí být přizpůsobena předpokládanému gradientu modelovaných polí. Na obrázku 7.5.1-4 je příklad geometrie interiéru osobního vozu. V prostoru předních sedaček a palubní desky (vyznačeno oranžově) jsou očekávány, vlivem proudění vzduchu z výustek na palubní desce, vyšší gradienty a fluktuace rychlostního a teplotního pole, a z toho důvodu je i rozlišení povrchové sítě vyšší. Naopak v zadní části kabiny (vyznačeno modře) jsou tvary povrchů i očekávané gradienty polí nižší takže i detaily sítě mohou být nižší. Příklad objemové sítě buněk s různou hustotou je uveden na obrázku Obr. 10.3-3.

7.5.2 Vliv kvality dat pro definici okrajových podmínek

Obecně lze říci, že kvalita výsledků podstatným způsobem závisí na kvalitě okrajových podmínek. Z principu CFD totiž jednoznačně vyplývá, že většina fyzikálních kvantit a kvalit, které získáme jako výsledek simulace je přímo více či méně výsledkem parametrů kvantit a kvalit zadaných na okrajových podmínkách. U modelování kabin dopravních prostředků a úloh techniky prostředí je především nezbytné správně rozdělit geometrii modelu podle materiálů tvořících stěny a korektně poté definovat jejich vlastnosti. O jak složitý problém se jedná mohou ilustrovat kapitoly 10, 11.2 a popisy konstrukce a materiálů makety v kapitole 9. Nutná data pro popis okrajových podmínek lze rozlišit do následujících oblastí

- Data popisující vlastnosti materiálů tvořících stěny či hranice modelu (např. tabulka Tab. 10.2-1)
- Data popisující parametry proudů (rychlosti, teploty atd.) (např. tabulka 9.3-1 a 9.3-2)
- Data popisující okolní a počáteční podmínky (např. tabulka 9.3-2)

Zdlouhavé dohledávání dat a shánění různých podkladů či výsledků měření vede často tvůrce modelů k náhradě dat parametrů některých okrajových podmínek "kvalifikovanými odhady" těchto parametrů. Ze zkušeností autora však vyplývá, že toto zjednodušení je často zdrojem zásadních chyb a znehodnocuje tak kvalitu výsledného modelu i výsledků z něj získaných.

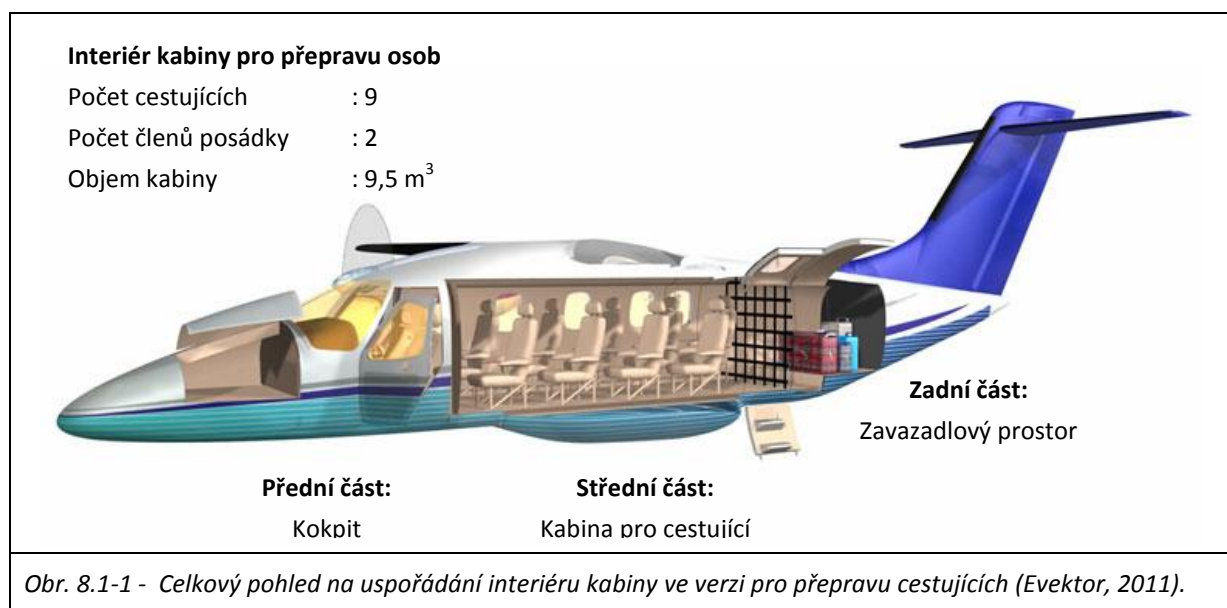
8 POPIS KABINY MODELOVANÉHO LETADLA

Protože se uspořádání interiéru a konstrukce ECS v jednotlivých typech letadel může diametrálně lišit, byl autorem zvolen letoun EV-55, jako referenční model uspořádání interiéru kabiny. Dalším důvodem také byla ochota společnosti Evektor spol. s r.o., která je koordinátorem projektu vývoje letounu (popis viz kapitola 8.1), poskytnout potřebná data o geometrii a funkcích ECS. Firma také věnovala maketu kabiny a část vnitřního vybavení pro experimentální účely této práce (viz kapitola 9.1.1).

8.1 Popis letadla a verzí vybavení kabiny

Letadlo EV-55 Outback vznikalo v rámci vývoje v letech 2003 až 2010 za přispění prakticky všech významných firem leteckého průmyslu v ČR. Od začátku vývoje bylo letadlo koncipováno jako univerzální malé letadlo s možností vzletu a přistání z nezpevněných ploch či vodní hladiny. Tomu odpovídala i vybraná koncepce hornoplošníku, která je pro takové podmínky vhodnější. Rozpětí křídel činí 16,10 m, celková délka pak 14,35 m. Letadlo je poháněno dvěma turbopvrtulovými motory Pratt & Whitney PT6A-21 umístěnými na křídle. Maximální vzletová hmotnost je rovna 4600 kg z čehož maximální užitečné zatížení činí 1824 kg. Letadlo má projektovou maximální horizontální rychlost 408 km/h a dolet cca 825 námořních mil při zatížení 1800 liber (plně obsazená kabina + dva členové posádky). Protože kabina není přetlaková je maximální dostup letadla cca 3000 m.n.m. Kabina letadla má rozměry délka: 4,48 m; šířka: 1,61 m a výška 1,37 m s celkovým objemem 9,47 m³. Uspořádání a vybavení interiéru bylo navrženo jako maximálně univerzální z čehož vycházejí i tři základní verze interiéru a dvě doplňkové verze (Evektor, 2011).

- Pro přepravu cestujících



- Pro přepravu nákladů

Interiér kabiny - nákladní verze

Počet členů posádky : 2
Objem kabiny : 9,5 + 2,7 m³

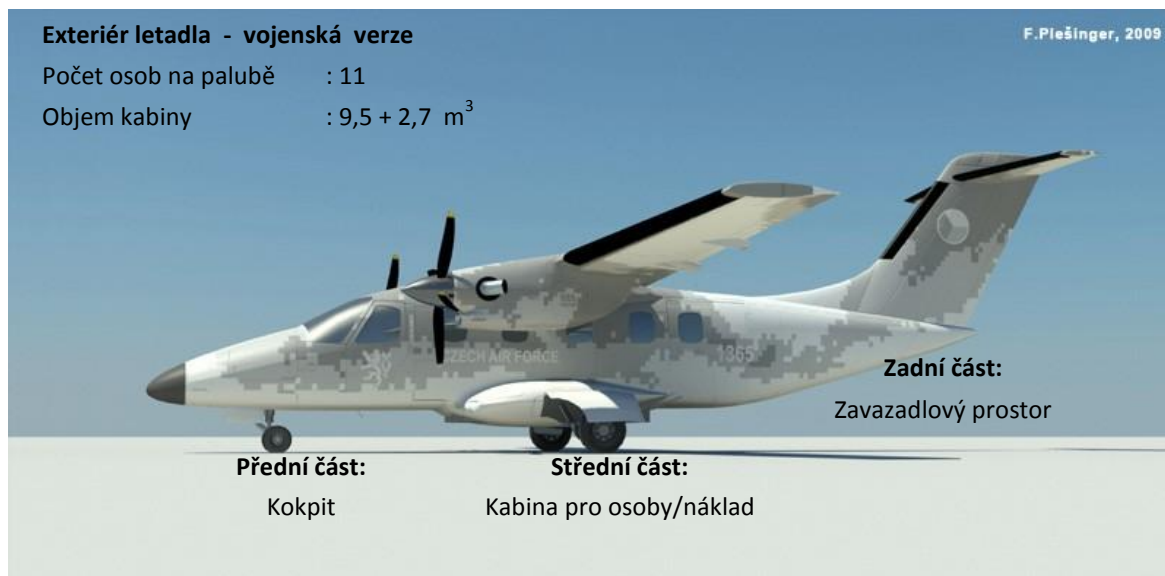


Obr. 8.1-2 - Celkový pohled na uspořádání interiéru kabiny ve verzi pro přepravu nákladu (Evektor, 2011)

- Vojenská verze

Exteriér letadla - vojenská verze

Počet osob na palubě : 11
Objem kabiny : 9,5 + 2,7 m³

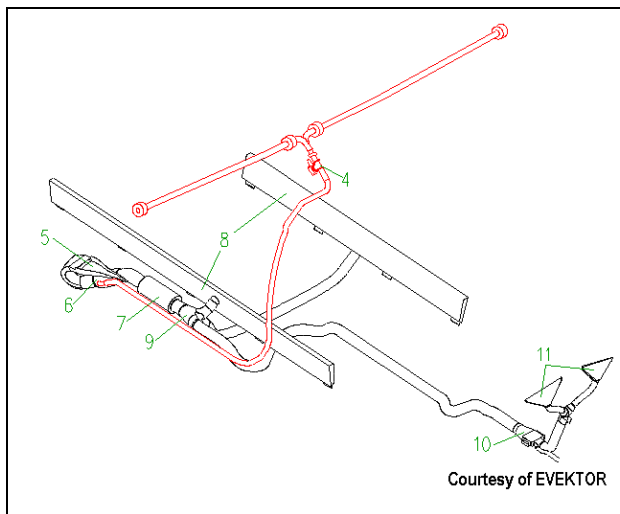


Obr. 8.1-3 - Celkový pohled na exteriér letadla ve vojenské verzi (Evektor, 2011)

- Verze kombinovaná
- Luxusní verze interiéru (v plánu)

8.2 ECS letadla

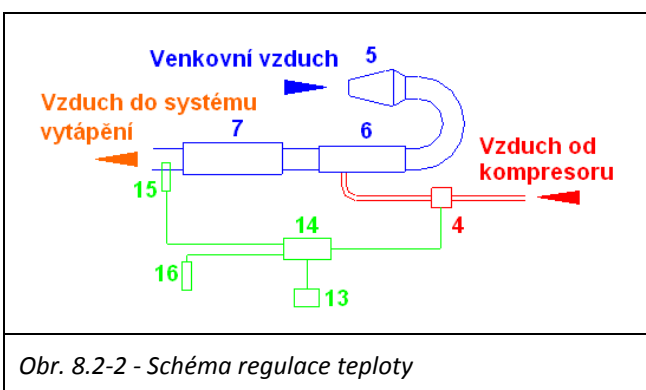
Horký vzduch pro vytápění je odebírán z kompresorů obou motorů (viz Obr. 8.2-1 a 8.2-2). Na výstupu z motoru je umístěn uzavírací ventil (1). Horký vzduch je veden potrubím opatřeným tepelnou izolací do prostoru centroplánu křídla, kde se levá a pravá větev horkého vzduchu spojuje ve slučovači (3). V pravé i levé větvi jsou těsně před slučovačem instalovány zpětné ventily (2). Vzduch dále prochází omezovačem průtoku (20), který zajišťuje dostatečný přetlak do odběru vzduchu (21) pro systém pneumatického odledňování. Za omezovačem průtoku prochází horký



Obr. 8.2-1 - Hlavní části ECS

vzduch regulačním ventilem (4), který řídí dodávané množství horkého vzduchu z kompresorů motorů do směšovače (6). Ve směšovači je horký vzduch směšován s chladným, čerstvým vzduchem, který je do směšovače přiváděn hlavním NACA vstupem vzduchu (5 - viz Obr.8.2-4) (vyvinutý National Advisory Committee for Aeronautics v roce 1945 pro aplikace v letectví). Při stání na zemi zajišťuje potřebné množství vzduchu ventilátor umístěný v bypassu. Smíšený vzduch dále prochází přes tlumič hluku (7) do rozdělovací regulační klapky (9), jejíž nastavení určuje poměr jakým se rozdělí přiváděné množství vzduchu mezi prostor pilotní kabiny a prostor kabiny pro cestující. V prostoru kabiny pro cestující je vzduch rozváděn pomocí vzduchovodů (8) umístěných v levé a pravé

stěně kabiny. Do pilotního prostoru je teplý vzduch veden flexibilním vzduchovodem. Ve středním panelu pilotního prostoru je umístěna klapka přerozdělení nohy-okno (10), jejíž nastavení určuje rozdělení přiváděného vzduchu mezi výstky u nohou pilotů a výstky u spodní hrany předních skel (11). Ze vzduchovodu v blízkosti klapky přerozdělení nohy-okno vede odbočka

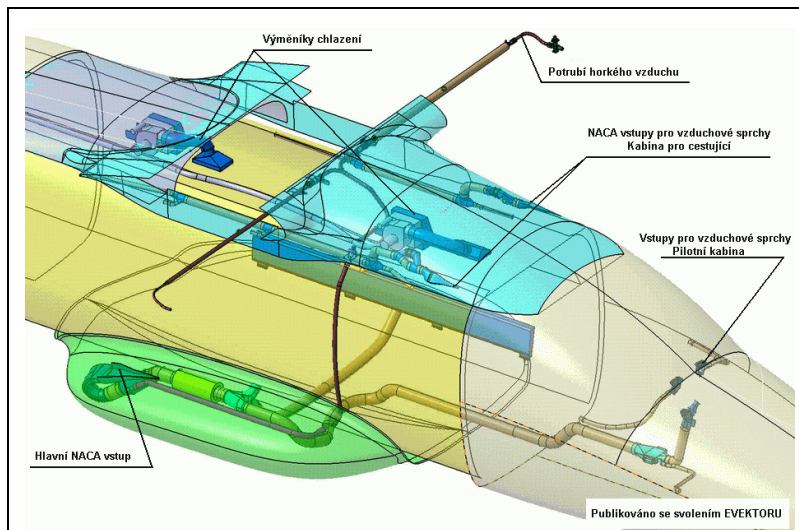


Obr. 8.2-2 - Schéma regulace teploty

(12) pro vytápění prostoru hydraulických agregátů v přední části trupu. Vzduch je odváděn jednou odváděcí vyústkou, umístěnou v zadní části kabiny v zavazadlovém prostoru. Regulace teploty v kabině je prováděna pomocí automatické řídicí jednotky (14). Jednotka vyhodnocuje teplotu v kabině měřenou pomocí teplotního čidla (16) a teplotu smíšeného vzduchu za tlumičem pomocí teplotního čidla (15), které je umístěno v jedné z větví. Jednotka na základě informací z teplotních čidel a nastavení teploty na ovladači (13) ovládá regulační ventil (4) a reguluje přívod horkého vzduchu do směšovačů pro udržení nastavené teploty. Vzduch vstupující do kabiny nesmí mít vyšší teplotu než 80°C (Evektor, 2005).

Větrání kabiny

V chladném prostředí se přivádí takové množství vzduchu o náležitě teplotě, které zajistí nejen větrání, ale i teplovzdušné vytápění kabiny. V teplém prostředí je větrání v kabině zajištěno stejným způsobem jen s tím rozdílem, že množství čerstvého vzduchu je redukováno na minimální hygienické množství. Přívod teplého vzduchu z kompresoru je



Obr. 8.2-3 - Umístění hlavních částí ECS

v těchto případech vypnut. K doplňkovému větrání se využívají individuální vzduchové sprchy. Vzduch je k nim přiváděn levým a pravým vzduchovodem ve stropní části kabiny, přičemž teplota vzduchu není nijak upravována. Každý vzduchovod má vlastní NACA vstup vzduchu umístěný v horní přední části trupu (viz Obr. 8.2-3) a v každém vzduchovodu je také instalován bypass s ventilátorem, který zajišťuje

dodávku vzduchu při stání na zemi. Individuální vzduchové sprchy jsou instalovány i v pilotní kabině. K těmto sprchám je vzduch přiváděn pomocí vstupů vzduchu umístěnými před čelními okny (Evektor, 2005).

Systém chlazení



Obr. 8.2-4 - Umístění hlavního NACA vstupu na prototypu letadla (Evektor, 2011)

V rámci volitelného vybavení bude možné vybavit letoun výparníkovou chladicí jednotkou. Ta se skládá z kompresorové jednotky umístěné v zavazadlovém prostoru a dvou výparníkových jednotek umístěných ve stropní části kabiny letounu (viz Obr. 8.2-3). Ventilátory jednotek nasávají vzduch z prostoru kabiny přes chladicí výměníky a ochlazený jej vracejí zpět do prostoru kabiny. Chlazení je

cirkulační, tzn. ochlazuje pouze vzduch z prostoru kabiny a nepřivádí žádný čerstvý vzduch (Evektor, 2005).

9 MĚŘENÍ VNITŘNÍHO PROTŘEDÍ V MAKETĚ KABINY

Kapitola popisuje provedení měření proudových a teplotních polí v maketě kabiny malého dopravního letadla, která byla společně s tratí v rámci zpracování disertační práce instalována v těžkých laboratořích Energetického ústavu, FSI. Podrobně je popsána samotná maketa a měřicí trať, přístrojové vybavení a je proveden rozbor nejistot měření. Následně jsou popsány jednotlivá měření a modelové případy, které byly měřeny.

9.1 Popis experimentu

Hlavním cílem experimentu bylo proměřit proudová a teplotní pole v maketě kabiny letadla a získat tak sadu výsledků pro validaci CFD modelu. Zároveň, ale také bylo nezbytné získat odpovídající sadu okrajových podmínek pro správný popis a matematickou reprezentaci parametrů okolního prostředí, v kterém byly experimenty konány. Těmto účelům byl přizpůsoben návrh měřicí tratě, přístrojového vybavení, kalibračních měření i softwaru pro záznam a zpracování dat.

9.1.1 Popis makety a měřicí tratě

Konstrukce makety: Maketa interiéru kabiny letadla EV-55 byla pro účely disertační práce autora, věnována firmou Evektor spol. s r.o. (viz Obr. 9.1.1-1). Původně vznikla pro designérské účely a vývoj prototypu letadla z čehož pramení i některá specifika jejího dělení do částí a konstrukce. Dělení makety respektuje rozdělení skutečné kabiny do tří sekcí - kokpitu, kabina cestujících a zavazadlový prostor. Sekce kokpitu nebyla z důvodů zachování firemního tajemství dodána, proto byla kabina cestujících v přední části prodloužena nastavovacím kusem tak, aby vznikl prostor s objemem odpovídající původnímu kokpitu. Konstrukce kabiny je provedena převážně z překližky, dřevotřísky, sololitu a kartonového papíru (viz Obr. 9.1.1-2). Překližka byla využita na podlahu makety, zadní přepážku a jednotlivá žebra a rozpěry stěn a stropu. Z dřevotřísky je tvořena podlaha nastavovacího kusu/kokpitu a přední přepážka. Potah makety byl vytvořen ze sololitu, přičemž bylo plně využito jeho ohebnosti a tvarovatelnosti. Strop makety byl vyroben s kartonového papíru.

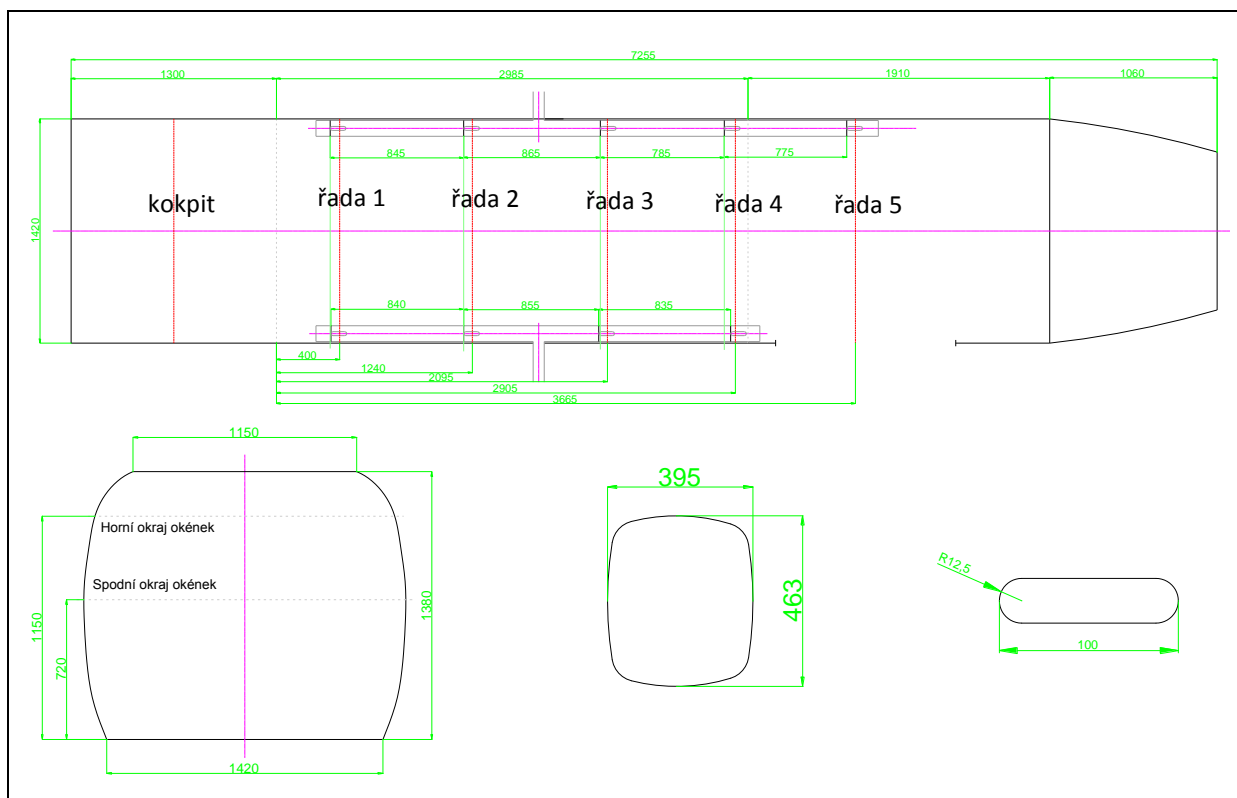


Obr. 9.1.1-1 - Pohled na levou stranu makety se vstupními dveřmi a na pravou stranu makety s hlavním přívodem vzduchu od ventilační jednotky.



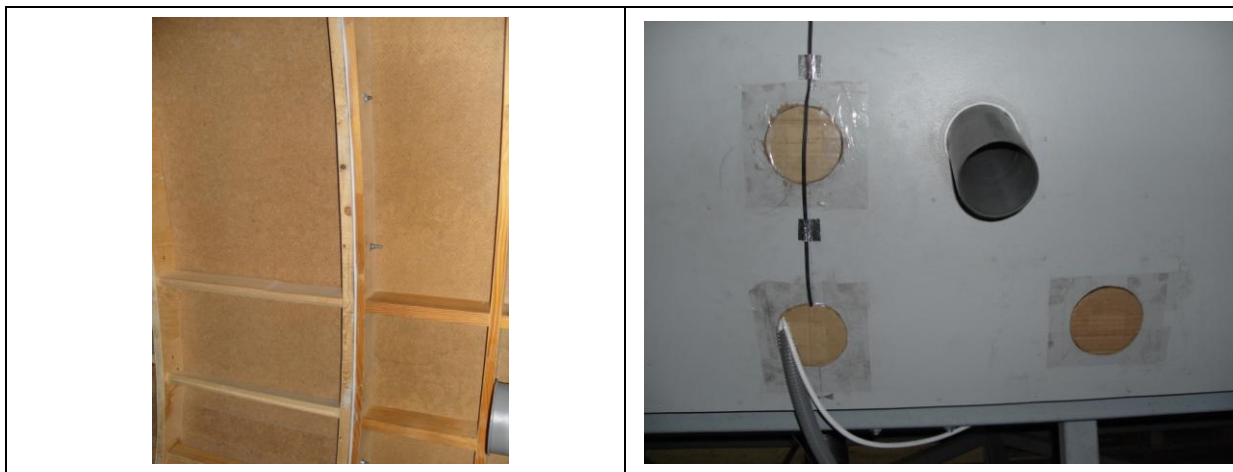
Obr. 9.1.1-2 - Pohled do interiéru kabiny - kokpit a kabina cestujících (vlevo) a vstupní část a zavazadlový prostor (vpravo). Na obrázcích je patrné provedení žeber z překližky a umístění vstupních dveří.

Jak již bylo zmíněno maketa nejprve sloužila pro designéra účely, proto bylo ve stěnách vyřezáno celkem 14 otvorů pro okénka. Výplň okének byla vytvořena překrytím otvorů komůrkovým polykarbonátem o tloušťce 4 mm. Vstupní dveře o šířce 1140 mm jsou umístěny v levé stěně zadní sekce makety (viz Obr. 9.1.1-2). Celá konstrukce makety kabiny je ustavena na podstavci o výšce 60 cm, svařené z ocelových profilů. Podstavec je opatřen šroubovacími nastavitelnými nožičkami, které umožňují finální vodorovné ustavení makety. Rozměry jednotlivých sekcí, celkové rozměry makety a umístění vzduchovodů je uvedeno na obrázku 9.1.1-3. Podrobné vlastnosti materiálů viz tabulka 10.2-1.




Obr. 9.1.1-3 - Hlavní rozměry makety, rozměry výustek, rozměry vzduchovodů a poloha měřících řezů

Protože se maketa skládá ze tří částí a ve stěnách byla vytvořena řada průchodů a netěsností, byla maketa před započítím měření pečlivě sestavena, šrouby spojující příruby sekcí byly dotaženy a mezi příruby byl aplikován těsnící silikon. Pečlivě byly také utěsněny všechny průchody vzduchotechniky a nevyužité průchodky byly zaslepeny (viz Obr.9.1.1-4)

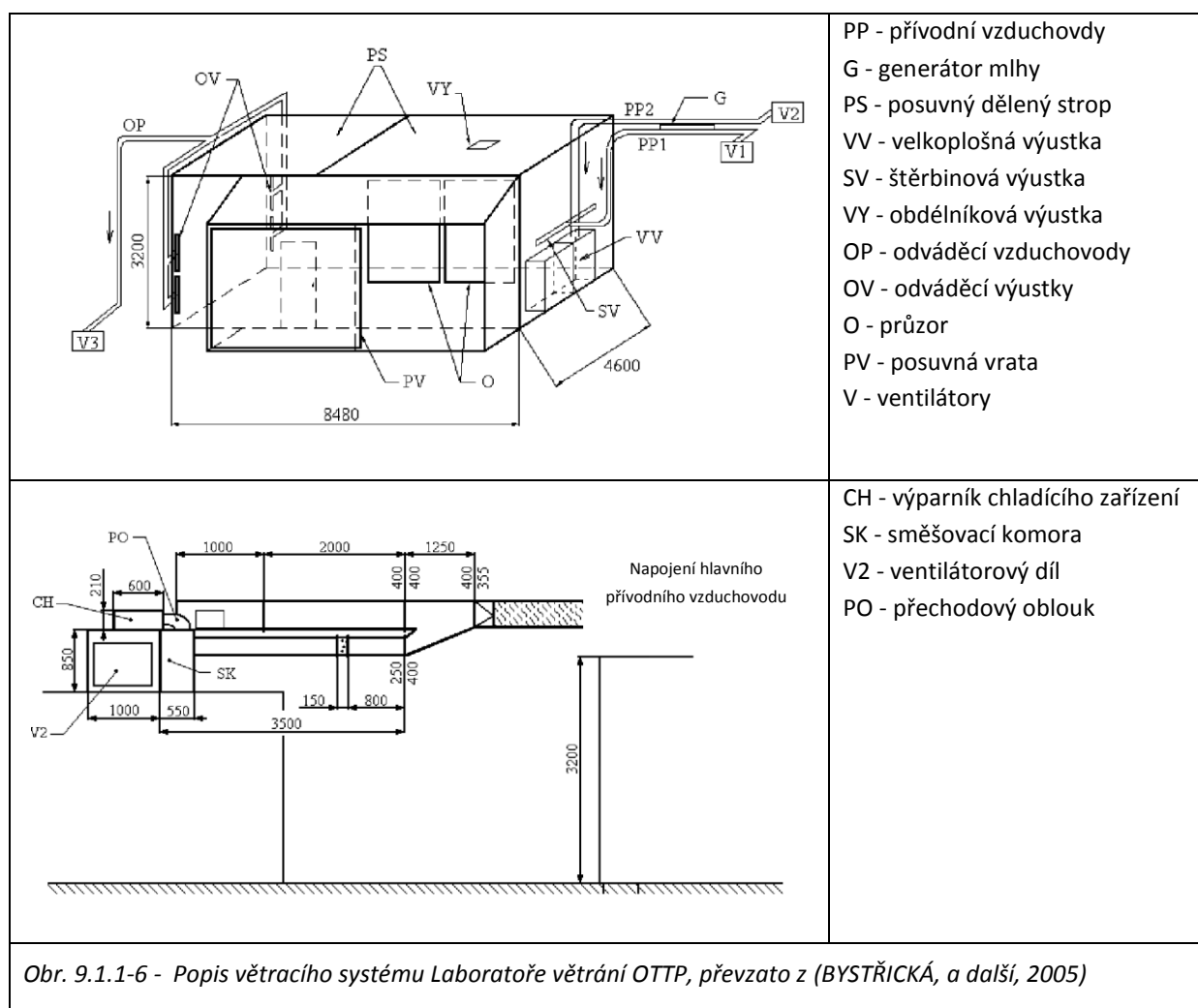


Obr. 9.1.1-4 - Detaily těsnění makety - utěsnění příruby mezi kokpitem a kabinou cestujících (vlevo), detail zatěsnění prostupu pravého vzduchovodu pláštěm kabiny a zaslepení nevyužitých průchodů (vpravo).

Konstrukce vzduchovodů a větrací jednotky: Základní verze testovacích vzduchovodů byla získána společně s maketou. Vzduchovody byly vytvořeny z polypropylénového potrubí běžně využívaného pro sanitární rozvody v budovách. Důvodem pro volbu byla především snadná dostupnost, dobrá obrobiteľnosť a finanční nenáročnosť materiálu. Základ vzduchovodu je tvořen přívodním T-kusem (vstupní průměr 70 mm) na který jsou napojeny přední část (průměr 100 mm) s dvěma výstky a zadní část s dvěma výstky u levého a třemi výstky u pravého vzduchovodu. Podélná osa vzduchovodů je umístěna 330 mm nad podlahou makety, přičemž osa kolmá na plochu výstky svírá s podlahou úhel 75 stupňů. Hlavní rozměry, umístění vzduchovodů a rozmístění výstek na vzduchovodu jsou znázorněny na obrázcích 9.1.1-3 a 9.1.1-5. Na vstupní T-kusy jsou připojeny přívodní flexibilní hadice z hliníku (průměr 80 mm), které jsou připojeny k rozdělovací komoře umístěné v podstavci makety (viz Obr. 9.1.1-5). Rozdělovací komora byla také získána spolu s maketou a je vyrobena z plastu ABS metodou rapid-prototyping. Hlavní připojovací hrdlo komory má průměr 100 mm a je připojeno flexibilní hliníkovou hadicí na elektrický ohřívač vzduchu o špičkovém výkonu 1,2 kW. Ohřívač je dále připojen přes flexibilní hliníkovou hadici a přechod 125/160 na hlavní přívodní vzduchovod, kterým je maketa připojena k ventilační jednotce laboratoře větrání. Hlavní přívodní vzduchovod je sestaven z polypropylénového potrubí o průměru 160 mm a jeho celková délka činní cca 19 m (viz Obr. 9.1.1-7). Před přechodovým kusem 125/160 je vřazen do vzduchovodu revizní T-kus, který byl využit především při kalibraci měření průtoku pomocí Wilsonovy mříže (viz kapitola 9.1.3). Vzhledem k vzdálenosti makety od ventilační jednotky a členitosti nosné konstrukce budovy těžké laboratoře jsou součástí vzduchovodu i čtyři kolena 87° a jedno koleno 45° s napojeným redukčním kusem 160/350.

Umístění vzduchovodů v maketě	Přívod levého vzduchvodu
	
Rozdělovací komora a el. ohříváč	Přívod pravého vzduchvodu
	
Detail rozdělovací komory	Zakončení hl. přívodního vzduchvodu u makety
	
Obr. 9.1.1-5 - Umístění vzduchovodů v kabině, detaily přívodních hadic, připojení na rozdělovací komoru a zakončení hlavního přívodního vzduchovodu	

Hlavní přívodní vzduchovod je napojen na vzduchotechnický systém Laboratoře větrání OTTP, jehož náčrtek a popis je uveden na obrázku 9.1.1-6. Jelikož byla laboratoř navržena na současné konání více experimentů, je vzduchotechnické zařízení vybaveno dvěma samostatnými větvemi s přívodními vzduchovody PP1 a PP2 a dvěma páry odsávacích výustek OV napojených na odváděcí vzduchovod OP. Hlavní přívodní vzduchovod makety byl napojen na větev 2 (PP2), která byla původně navržena na zásobování velkoplošné výustky VV a je napojena na ventilátor V2. Ventilátor je typu KDKL-2 velikost 040 z výrobního programu firmy Kovona Karviná. Maximální příkon ventilátoru je 3000 W při maximálním objemové průtoku $0,65 \text{ m}^3/\text{s}$, regulace otáček je prováděna pomocí frekvenčního měniče v rozsahu 0 - 1400 ot/min. Ventilátor je na straně sání osazen filtračním dílem. Větev 2 je dále doplněna o chladič CH, který zajišťuje chlazení nasávaného vzduchu a směšovací komoru SK (viz Obr. 9.1.1-6). Jako chladič slouží výparník chladicího zařízení mezistropní klimatizační jednotky firmy FUJITSU, jejíž výkon je 3,1 kW. Regulace teploty je prováděna pomocí směšovací komory (SK) s regulační klapkou, která je umístěna mezi výparníkem chladicího zařízení a ventilátorem (BYSTRICKÁ, a další, 2005) (BYSTRICKÁ, a další, 2007). Velkoplošná výustka byla připojena pomocí flexibilního vzduchovodu průměru 350 mm, který byl na straně u výustky odpojen a přes redukci 350/160 mm připojen na hlavní přívodní vzduchovod makety.



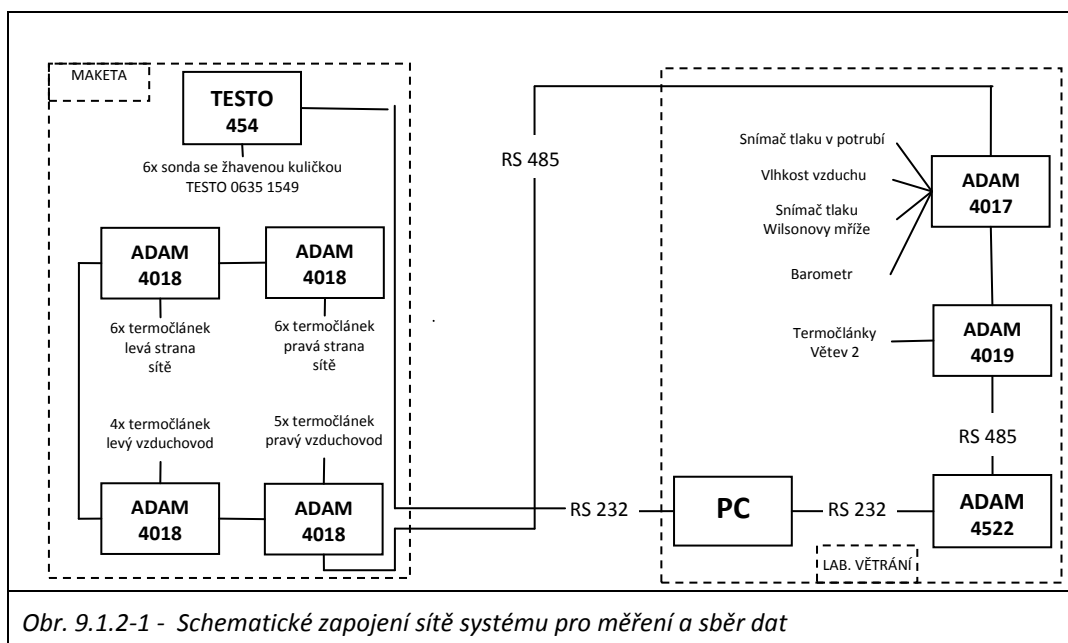
Obr. 9.1.1-6 - Popis větracího systému Laboratoře větrání OTTP, převzato z (BYSTRICKÁ, a další, 2005)



Obr. 9.1.1-7 - Hlavní přívodní vzduchovod makety (oranžová barva - vlevo) a větev 2 větracího systému Laboratoře větrání (vpravo). Poznámka: v době focení byl hlavní vzduchovod makety od systému odpojen.

9.1.2 Popis systému pro sběr dat, použitých sond a přístrojů

Laboratoř větrání byla vybavena systémem pro sběr a záznam dat postaveným na měřicích modulech firmy Advantech ADAM 4000. Autor systému jej popisuje takto "Systém propojuje měřicí počítač s potřebnými měřicími přístroji a čidly v jeden celek, který umožňuje současné měření všech důležitých fyzikálních veličin, jako je tlak, teplota a průtok vzduchu v potrubí. Jako základ je zvoleno sériové rozhraní postavené na sběrnici RS 232. Samostatné měřicí moduly ADAM komunikují pomocí rozhraní RS 485 a pomocí převaděče RS 485/RS 232 jsou připojeny k měřicímu počítači. Softwarový měřicí systém v prostředí LabView umožňuje řídit celý proces měření z jednoho místa a ukládat požadovaná data ve vhodném formátu. Hlavní část hardware trati pro měření a zpracování signálů z čidel a přístrojů byla realizována z měřicích modulů ADAM 4000. Pro měření průtoku byla využita Wilsonova mříž 250x400 mm nainstalovaná do výstupního vzduchovodu ventilátoru." (KOŠNER, 2002)



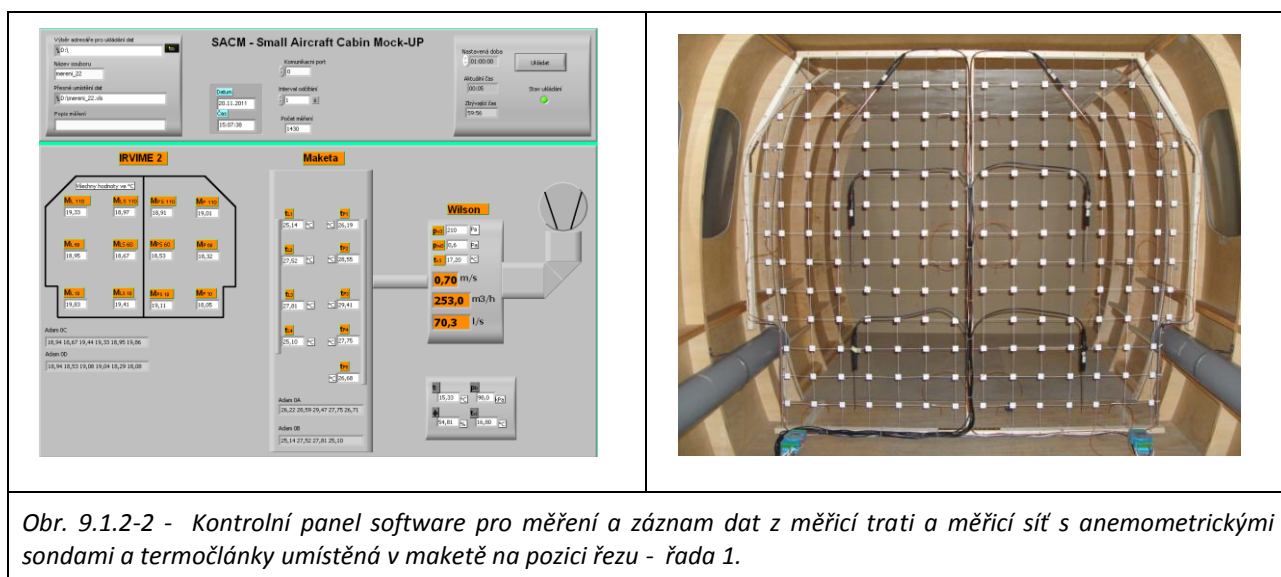
Obr. 9.1.2-1 - Schematické zapojení sítě systému pro měření a sběr dat

Základní síť modulů byla rozšířena o čtyři moduly ADAM 4018 pro měření teplot v maketě připojené pomocí sériové linky RS 485 a přístroj TESTO 454 s šesti anemometrickými sondami se žhavenou kuličkou (viz Obr. 9.1.2-2). Přístroj TESTO 454 byl připojen přes sériovou linku RS 232 přímo do měřicího PC.

Sondy v maketě byly rozmístěny následovně:

- První modul ADAM 4018 - 5x termočlánek typu T pro měření teploty přiváděného vzduchu z výustek na pravém vzduchovodu (označení P1 až P5).
- Druhý modul ADAM 4018 - 4x termočlánek typu T pro měření teploty přiváděného vzduchu z výustek na levém vzduchovodu (označení L1 až L4).
- Třetí modul ADAM 4018 - umístěn na měřicí mříži - 6x termočlánek typu T pro měření teploty v levé části řezu kabiny (označení ML10, ML60, ML110, MLS10, MLS60 a MLS110).
- Čtvrtý modul ADAM 4018 - umístěn na měřicí mříži - 6x termočlánek typu T pro měření teploty v pravé části řezu kabiny (označení MP10, MP60, MP110, MPS10, MPS60 a MPS110).
- Anemometrické sondy - umístěny na měřicí mříži - sondy 1, 3 a 5 levá strana, sondy 2, 4 a 6 pravá strana (viz Obr. 9.1.2-2).

Pro záznam dat byl přizpůsoben a rozšířen měřicí software naprogramovaný v prostředí LabView. Rozšíření a úprava se týkala především přizpůsobení komunikace v síti měřicích modulů pro periodický sběr dat z modulů laboratoře a modulů umístěných v maketě. Protože byly všechny termočláanky před započítím měření kalibrovány, bylo nezbytné měřicí software rozšířit o korekční/přepočtové funkce měřené teploty. Z důvodů zvýšení přesnosti měření objemového průtoku byla také kalibrována Wilsonova mříž, a korekční funkce byla taktéž naprogramována do modulu pro výpočet objemového průtoku z hodnot naměřených na mříži. Software umožňoval nastavení periody sběru dat a celkové délky měření. Grafické rozhraní software je uvedeno na obrázku 9.1.2-2.



Obr. 9.1.2-2 - Kontrolní panel software pro měření a záznam dat z měřicí trati a měřicí síť s anemometrickými sondami a termočláanky umístěná v maketě na pozici řezu - řada 1.

9.1.3 Kalibrace termočlánků a sond

Všechny termočlánky použité v maketě byly vyrobeny autorem přímo pro měření spojená s disertační prací. Pro zvýšení přesnosti měření a zjištění vlastností vyrobených článků byla provedena jejich kalibrace (viz podkapitola Kalibrace termočlánků). Protože vlivem velké tlakové ztráty vzduchovodů experimentální trati, byly u Wilsonovy mříže dosahovány velice nízké rychlosti a tím pádem i malé rozdíly tlaků, bylo provedeno kalibrační měření průtoku pomocí rastrujících sond ve svislém potrubí hlavního přívodního vzduchovodu bezprostředně u makety (viz podkapitola Kalibrace Wilsonovy mříže).

Kalibrace termočlánků

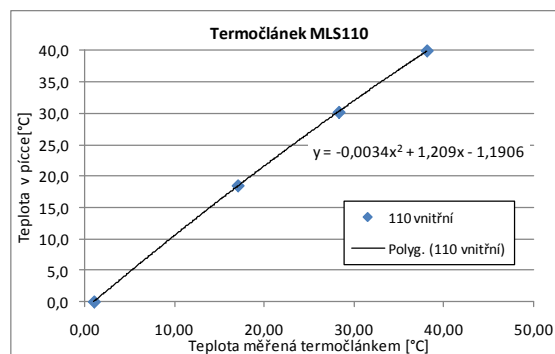
Tab. 9.1.3-1 Kalibrační funkce termočlánků

Označení termočlánku	Korekční funkce
ML10	$y = -0,0032x^2 + 1,2066x - 1,2335$
ML60	$y = -0,0033x^2 + 1,1932x - 1,2554$
ML110	$y = -0,0043x^2 + 1,2459x - 1,5331$
MLS10	$y = -0,0024x^2 + 1,1606x - 0,5986$
MLS60	$y = -0,0034x^2 + 1,2043x - 0,8274$
MLS110	$y = -0,0034x^2 + 1,209x - 1,1906$
MP10	$y = 0,0014x^2 + 1,0467x + 0,2913$
MP60	$y = -0,0032x^2 + 1,1827x - 0,5172$
MP110	$y = -0,0031x^2 + 1,1888x - 0,347$
MPS10	$y = -0,0036x^2 + 1,2035x - 0,2512$
MPS60	$y = -0,0027x^2 + 1,1602x + 0,3169$
MPS110	$y = -0,0017x^2 + 1,1349x + 0,3867$
L1	$y = -0,0031x^2 + 1,1924x - 1,4974$
L2	$y = -0,0027x^2 + 1,1614x - 0,8627$
L3	$y = -0,0026x^2 + 1,1595x - 0,837$
L4	$y = -0,0027x^2 + 1,1563x - 0,8685$
P1	$y = -0,0044x^2 + 1,2367x - 0,1578$
P2	$y = -0,0044x^2 + 1,2462x - 0,3236$
P3	$y = -0,0042x^2 + 1,2311x - 0,2581$
P4	$y = -0,0019x^2 + 1,1188x + 0,7408$
P5	$y = -0,0024x^2 + 1,1419x + 0,2754$

Protože byly požadované délky termočlánků, vzhledem k různým umístění značně rozdílné, bylo přistoupeno k jejich výrobě svařováním z termočlánekového drátu. K dispozici byl drát konstantan-měď, z nějž byly nastříhány potřebné délky termočlánků a termočlánky byly vytvořeny svařením na ruční svářečce. Výhodou takového postupu je nízká cena vyrobených termočlánků, ale na druhou stranu je nezbytné provést kalibraci, neboť každý ručně vyrobený termočlánek má odlišné vlastnosti. Nevýhodou postupu je skutečnost že výroba a následná kalibrace je relativně časově náročná (autorovi zabrala výroba termočlánků, kalibrace a vyhodnocení dat přibližně jeden týden).

Kalibrační body byly zvoleny podle rozsahu kalibrační pícky a očekávaného rozsahu měřených hodnot. Kalibrační body byly: 0 °C; 18,2 °C; 30,2 °C a 40,1 °C (viz

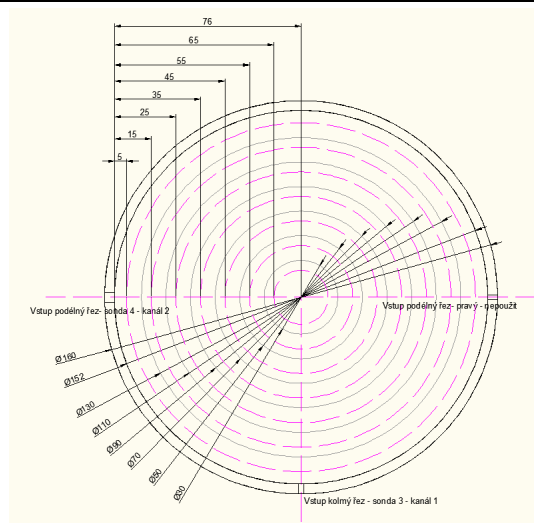
Obr. 9.1.3-1). Naměřenými body byl metodou nejmenších čtverců proložen polynom druhého řádu. Výsledné opravné funkce pro použité termočlánky jsou uvedeny v tabulce 9.1.3-1. Hodnota měřená termočlánekem je ve funkcích hodnota x a korigovaná hodnota je výsledek funkce y . Funkce pak byly použity v měřicím a záznamovém softwaru ke korekci hodnot získávaných z termočlánekových modulů ADAM a korigované hodnoty byly zaznamenávány jako výsledky měření teplot.



Obr. 9.1.3-1 - Ukázka kalibrace termočláneků v kalibrační pisce, kalibrační bod 30,2 °C a příklad proložení polynomu druhého stupně naměřenými body u termočlánu MLS 110.

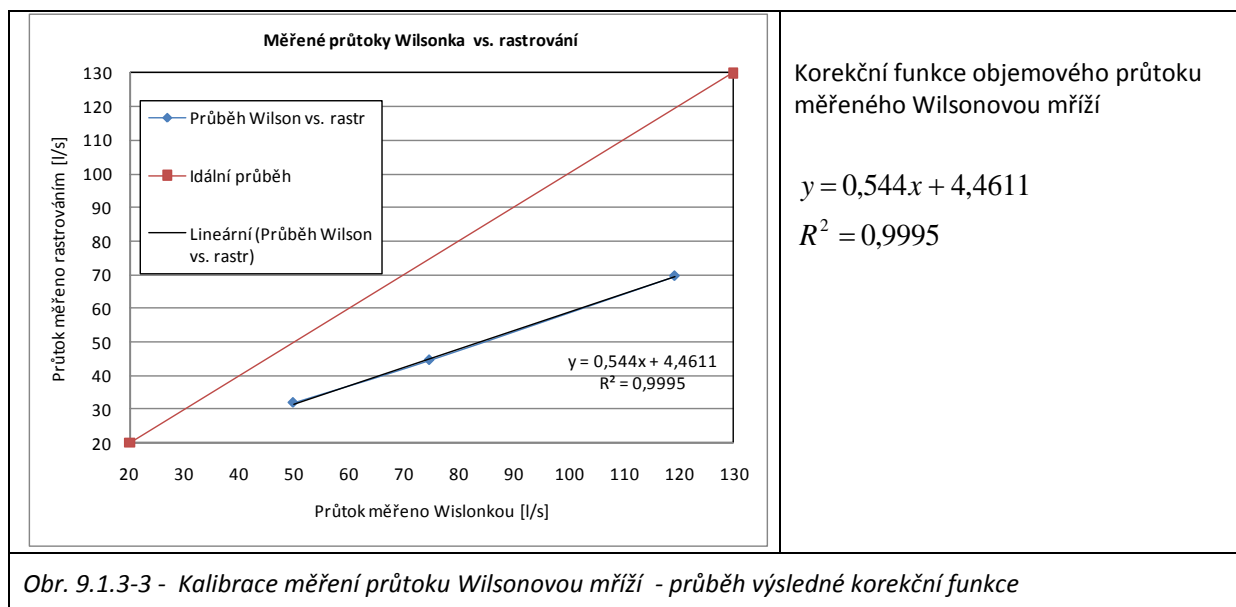
Kalibrace Wilsonovy mříže

Protože vlivem velké tlakové ztráty vzduchovodů experimentální trati, byly u Wilsonovy mříže dosahovány velice nízké rychlosti (pro případ A: cca 0,5 m/s; pro případ B: cca 0,8 m/s a pro případ C: cca 1,2 m/s) a tím pádem i malé rozdíly tlaků, bylo provedeno kalibrační měření průtoku pomocí rastrujících sond ve svislém potrubí hlavního přívodního vzduchovodu bezprostředně u makety. Na obrázku 9.1.3-2 je zobrazeno místo na hlavním přívodním vzduchovodu, kde bylo prováděno měření. Na pravém obrázku jsou uvedena místa měření sondami v potrubí a průměry použité pro výpočet plochy mezikruží při výpočtu celkového průtoku. Protože délka důlků anemometrických sond umožňovala proměřit celý průměr potrubí a celkem byly použity dvě sondy, byly pro každé mezikruží změřeny rychlosti ve čtyřech bodech, ve středovém kruhu pak celkem v šesti bodech. Výsledný průtok byl poté získán obvyklou metodou s tím rozdílem, že výsledná středová hodnota rychlosti byla vypočtena jako vážený průměr, kdy váhovými koeficienty jednotlivých rychlostí byly plochy mezikruží.



Obr. 9.1.3-2 - Kalibrace měření průtoku Wilsonovou mříží - umístění sond v potrubí a nákres měřících pozic

Graf na obrázku 9.1.3-3 uvádí výsledný průběh získané závislosti a korekční funkci, která byla implementována do měřicího software pro korekci výsledků objemového průtoku, měřeného Wilsonovou mříží. V tabulce 9.1.3-2, jsou uvedeny číselné hodnoty kalibračních bodů a rozšířené nejistoty měření.



Tab. 9.1.3-2 - Kalibrační měření průtoku vzduchu - Wilsonova mříž vs. rastrování

Označení případu	Wilsonova mříž [l/s]	Rastrování [l/s]	Wilson/Rastrování [-]	Nejistota [l/s]	Nejistota [%]
Případ A	49,8	31,9	1,563	±5,6	17,6
Případ B	74,6	44,6	1,675	±7,4	16,7
Případ C	119,3	69,5	1,716	±10,8	15,5

9.1.4 Rozbor nejistot měření

Rozbor a výpočet nejistot měření je velice složitou problematikou, která vychází především z poznatků statistiky, teorie pravděpodobnosti, teorie měření a je jednou z významných oblastí, kterou se zabývá věda zvaná metrologie. Autor práce není v žádné z těchto oblastí odborníkem, proto po pochopení a stručné uvedení dané problematiky do své práce využil především praktické návody a poznatky kolegů z pracoviště. Teoretický text následující podkapitoly ve velké míře čerpá z přehledného souhrnu teorie uvedené ve zdroji (HEJČÍK, 2009).

Pro zhodnocení spolehlivosti naměřených hodnot je nezbytné provést vyhodnocení nejistot měření a postupu zpracování naměřených výsledků. Při tomto konceptu je každému výsledku přiřazen parametr nazývaný "nejistota", charakterizující rozsah hodnot, v kterých se stanovenou pravděpodobností měřená veličina nabývá. Ke stanovení velikosti tohoto parametru se používají následující dvě metody (PALENČÁR, et al., 2001):

- statistické zpracování naměřených údajů (nejistoty typu A)
- jiné než statistické zpracování naměřených údajů (nejistoty typu B)

Zjednodušeně lze říci, že nejistoty typu A postihují náhodné „chyby“, vzniklé v průběhu měření (kolísání naměřených údajů), a nejistoty typu B „chyby“ měřicího řetězce. Je tedy zřejmé, že v technické praxi se jen velice zřídka setkáme s případy, kdy ke stanovení nejistoty měření lze použít pouze jeden z těchto přístupů. Ve většině případů je nutné určit celkovou nejistotu měření, která v sobě zahrnuje oba přístupy. Takovouto nejistotu měření je možné vypočítat jako druhou odmocninu součtu čtverců nejistot jednotlivých typů:

$$u_{Cy} = \sqrt{u_{Ay}^2 + u_{By}^2} \quad (9.1)$$

Celkovou nejistotu stanovenou dle (9.1) označujeme jako základní a vymezuje kolem naměřené (spočtené) hodnoty interval, v němž se daná veličina nachází s přibližně 68% pravděpodobností (pokud se veličina řídí normálním rozdělením). Pro dosažení vyššího pokrytí je zapotřebí standardní nejistotu rozšířit pomocí koeficientu rozšíření k_r , jehož význam je v podstatě shodný s významem kvantilů u Gaussova rozdělení (PALENČÁR, et al., 2001) a tedy $k_r = 2$ pro rozšíření na 95% pravděpodobnost, či $k_r = 3$ pro 99,7% pravděpodobnost. Rozšířenou nejistotu je pak možno vyjádřit vztahem:

$$U = k_r \cdot u_{Cy} \quad (9.2)$$

Základem při stanovení nejistot měření je tedy určit nejistoty jednotlivých typů. Jak již bylo zmíněno výše, vychází nejistoty typu A ze statistického zpracování dat. Dle (NĚMEČEK, 2008) se obvykle při určení hodnoty této nejistoty vychází ze vzorce 9.3. Pokud je počet měření vyšší než 10 pak hodnota koeficientu k_{uA} nabývá hodnoty 1. V případě s nižším počtem opakovaných měření je však nezbytné zohlednit malou četnost souboru dat a

následný vliv na spolehlivost odhadu rozptylu. Pro takové případy se velikost bezpečnostního faktoru určuje dle tabulky 9.1.4-1.

$$u_{Ay} = k_{uA} \cdot S_y = k_{uA} \cdot \frac{S_y}{\sqrt{n}} = k_{uA} \cdot \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \quad (9.3)$$

Tab. 9.1.4-1 - Hodnoty bezpečnostního faktoru pro určení u_{Ay} v případě $n < 11$ (převzato z (NĚMEČEK, 2008))

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10
k_{uA}	7,0	2,3	1,7	1,4	1,3	1,3	1,2	1,2	1

Vyjádření nejistot typu B je složitější, neboť pokud není k dispozici kalibrační list s uvedenou nejistotou, je zapotřebí tuto nejistotu odhadnout, což vyžaduje určité zkušenosti. V případě měřící trati byl nejčastěji použit postup uvedený v lit. (PALENČÁR, et al., 2001), kdy je nejprve odhadnuta hodnota změn (odchylek) $\pm z_{jmax}$ od jmenovité (nominální) hodnoty, jejíž překročení je málo pravděpodobné. Z této hodnoty se určí standardní nejistota typu B podle vztahu (9.4), kde hodnota součinitele rozšíření k odpovídá předpokládanému rozdělení pravděpodobnosti vyšetřované veličiny. Nejčastěji používanou je přitom hodnota $k = 3$ pro rovnoměrné rozdělení pravděpodobnosti, popř. $k = 2$ pro normální rozdělení.

$$u_{By} = \frac{z_{jmax}}{k} \quad (9.4)$$

Pokud do vyhodnocování daného typu nejistoty vstupuje více vlivů, je možné nejistotu daného typu určit pomocí nejistot jednotlivých vlivů u_i a jejich koeficientů citlivosti A_i dle vztahu

$$u_y = \sqrt{\sum_i A_i^2 \cdot u_i^2} \quad (9.5)$$

Vztah (9.5) se využívá také k vyhodnocování nepřímých měření, kde je výsledná hodnota stanovena z přímo naměřených hodnot pomocí funkční závislosti $Y = f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_m)$ a jednotlivé koeficienty citlivosti se určí jako parciální derivace funkce Y podle příslušné přímo měřené veličiny (PALENČÁR, et al., 2001).

$$A_i = \frac{\partial Y}{\partial X_i} = \frac{\partial f(X_1, X_2, X_3, \dots, X_i, \dots, X_m)}{\partial X_i} \quad (9.6)$$

Problematika stanovení nejistot u nepřímých měření je však daleko komplikovanější, neboť zde může docházet k vzájemným korelacím přímo měřených veličin (např. použitím stejného měřidla), které je potřeba při vyhodnocování nejistot zohlednit, čímž se celý proces výrazně komplikuje (PALENČÁR, et al., 2001).

Uvedené metody byly využity pro stanovení nejistot typu A a B u přímých měření i vyhodnocovaných veličin. Nejistoty typu B jsou pro všechny použité přístroje uvedeny v tabulce 9.1.4-2.

Tab. 9.1.4-2 - Standardní nejistoty měření pro použité přístroje

Veličina Přístroj/sonda	Standardní nejistota $u_B(X_i)$ [jednotka]	Typ rozdělení	Koeficient citlivosti A_i	Příspěvek ke standardní nejistotě $u_{B,i}$
Teplota vč. digitalizace termočlánek	$\frac{0,5}{\sqrt{3}}$ [K]	rovnoměrné	1	$u_B(T) = 0,289$ K
Barometrický tlak Airflow DB2	$\pm 1\%$ z měřené hodnoty + 1digit	rovnoměrné	1	$u_B(p_b) = (0,01 \cdot p_b + 100)$ Pa
Rychlost proudění TESTO 454 + sonda	$\pm(0,03 \pm 0,05 \cdot w)$ [m/s]	normální	1	$u_B(w) = (0,03; 0,05 \cdot w)$ m/s

Nejistoty nepřímých měření

Vyhodnocování nejistot u nepřímých měření probíhalo za předpokladu, že výsledky měření nejsou vzájemně korelovány, neboť k měření každé veličiny se používají individuální snímače. K záznamu naměřených hodnot jsou sice použity A/D převodníky od jednoho výrobce, nicméně tuto možnost korelace nejsme schopni nijak blíže analyzovat.

Dosažené celkové relativní rozšířené nejistoty měření U_{rel} (poměr celkové rozšířené nejistoty měření U a naměřené hodnoty y), jednotlivých vyšetřovaných veličin provedených měření, jsou uvedeny v tab. 9.1.3, 9.3-1 a 9.3-2 Tyto nejistoty jsou stanoveny pro 95% pravděpodobnost, což znamená, že skutečně naměřená hodnota Y nabývá hodnoty:

$$Y = \bar{y} \pm U_{rel} \cdot \bar{y} \quad (9.7)$$

s pravděpodobností 95 %, nebo také, že 95 % všech naměřených hodnot spadá do intervalu vymezeného vztahem (9.7).

9.2 Popis měřených modelových případů

Vzhledem k provozním vlastnostem měřicí trati, byly definovány tři modelové případy pro měření proudových a teplotních polí v maketě kabiny. Rozsah parametrů měření byl limitován možnostmi měřicí tratě a také umístěním makety v podzemních prostorách těžkých laboratoří Energetického ústavu.

Hlavním limitem parametrů modelových případů byly:

- Značná tlakové ztráta hlavního příváděcího vzduchovodu, která omezovala možný rozsah nastavovaných průtoků od cca 30 do 70 l/s.
- Závislost okolní teploty na ročním období a nemožnost regulace a udržování teploty okolí na požadované teplotě po celou dobu déletrvajícího měření.
- Nemožnost měření vytápění či chlazení kabiny z důvodu chybějícího teplotního spádu mezi vnitřním prostorem kabiny a okolím.

Vzhledem k výše uvedeným limitům byly vybrány pouze tři modelové případy, které se lišily pouze objemovým průtokem větracího vzduchu. Hlavní charakteristiky jednotlivých měřených modelových případů jsou uvedeny v tabulce 9.2-1. U všech měřených případů nebyla regulována teplota příváděného vzduchu, ale pouze jeho objemový průtok.

Tab. 9.2-1 - Popis měřených modelových případů

Označení případu	Hlavní návrhová charakteristika	Poznámka
Případ A	Objemový průtok cca 30 l/s	
Případ B	Objemový průtok cca 40 l/s	
Případ C	Objemový průtok cca 70 l/s	

Měření všech případů bylo uskutečněno v srpnu 2010 a probíhalo podle následujícího algoritmu.

- 1) Zapnutí všech přístrojů a zařízení měřicí tratě, kontrola funkčnosti softwaru pro sběr dat a kontrola komunikace modulů po síti.
- 2) Ustavení měřicí sítě se sondami v maketě do výchozí pozice - řez kokpit. Uzavření makety.
- 3) Stabilizace teploty ventilátorů, vzduchovodů a makety. Kontrola stability teploty a průtoků v trati. Fáze stabilizace trvala průměrně cca 60 min.
- 4) Měření a záznam dat v jednom řezu po dobu 300 s, perioda záznamu 1 s.
- 5) Otevření makety a posunutí měřicí mříže do polohy dalšího řezu. Uzavření makety a krátkodobá stabilizace vnitřního prostředí po dobu cca 5 min.
- 6) V průběhu krátkodobé stabilizace - časová synchronizace uložených dat pro teplotu vzduchu a rychlosti proudění. Uložení dat do databáze výsledků.

7) Opakování činnosti bodů 4 až 6 pro všechny řezy v celkem třech sadách pro všechny tři modelové případy.

9.3 Statistické zpracování naměřených výsledků - okrajové podmínky

Následující podkapitola uvádí výsledky zpracované z výsledků měření na měřící trati a v maketě kabiny. Měření všech případů bylo uskutečněno v srpnu 2010. Data získaná z měření na vzduchotechnice laboratoře větrání, teploty u distribučních výustek a rozdělení poměrů objemového toku do distribučních vzduchovodů byla využita jako okrajové podmínky pro validační simulace. Data získaná z měření proudových a teplotních polí v jednotlivých řezech kabiny byla využita pro validaci výsledků simulací (viz kapitola 10).

Při kalibraci Wilsonovy mříže byl změřen celkový objemový průtok dodávaný do makety při všech předpokládaných režimech měření. Protože však geometrie CFD modelu nezahrnovala rozdělovací komoru, bylo nezbytné určit měřením poměr rozdělení celkového objemového průtoku mezi pravým a levým vzduchovodem. Byla použita zjednodušená metoda, kdy do os přírodních potrubí T-kusů, byly nainstalovány dvě anemometrické sondy přístroje TESTO 454 (viz Obr. 9.3-1). Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce 9.3-1. První řádek uvádí průměrné hodnoty rychlosti proudění v osách levého a pravého T-kusu a průměrný objemový průtok vzduchu dodávaného do makety. Následně byl určen poměr rychlostí mezi levým a pravým vzduchovodem, přičemž je patrné, že poměr zůstává dobře zachován pro všechny tři měřené případy. Na základě toho poměru pak bylo určeno rozdělení objemového toku mezi distribuční vzduchovody, přičemž ve shodě s teorií bylo pozorováno, že do pravého vzduchovodu vzhledem k vyššímu počtu výustek proudí průměrně 56 % objemu vzduchu dodávaného vzduchotechnickým zařízením Laboratoře větrání. Zjištěné poměry a procentuelní rozdělení bylo využito pro výpočet vstupních rychlostí, které byly předepisovány na okrajové podmínky typu inlet/vstup v CFD modelu (viz Tab. 9.3-2).



Tab. 9.3-1 - Poměr rozdělení objemových průtoků mezi distribuční vzduchovody

Případ	Případ A			Případ B			Případ C		
	levý [m/s]	pravý [m/s]	průtok [l/s]	levý [m/s]	pravý [m/s]	průtok [l/s]	levý [m/s]	pravý [m/s]	průtok [l/s]
průměr	3,07	4,00	29,22	4,09	5,34	42,77	6,04	7,34	66,32
poměr	0,768			0,766			0,823		
poměr [%]	43,46	56,54		43,40	56,60		45,16	54,84	

Průměrné rozdělení objemového průtoku: Levý vzduchovod: 44 %, Pravý vzduchovod: 56 %

Souhrnné výsledky z měření, které byly využity jako okolní a okrajové podmínky při validačních simulacích jsou uvedeny v tabulce 9.3-2. Hodnoty barometrického tlaku byly využity jako referenční hodnoty tlaku okolí, teplota v laboratoři, byla použita jako teplota okolí makety a referenční hustota vzduchu byly vypočtena na základě předešlých dvou hodnot dosazených do stavové rovnice. Celkový průtok byl rozdělen podle poměru zjištěného z měření a z průřezu přírodních vzduchovodů byla určena vstupní rychlost pro pravý a levý vstup. V neposlední řadě byla na základě teplot změřených termočlánky u jednotlivých výustek, určena průměrná hodnota teploty přiváděného vzduchu pro pravý a levý distribuční vzduchovod, která byla předepsána jako teplota pro pravý a levý vstup.

Tab. 9.3-2 - Parametry prostředí v laboratoři a parametry větracího vzduchu

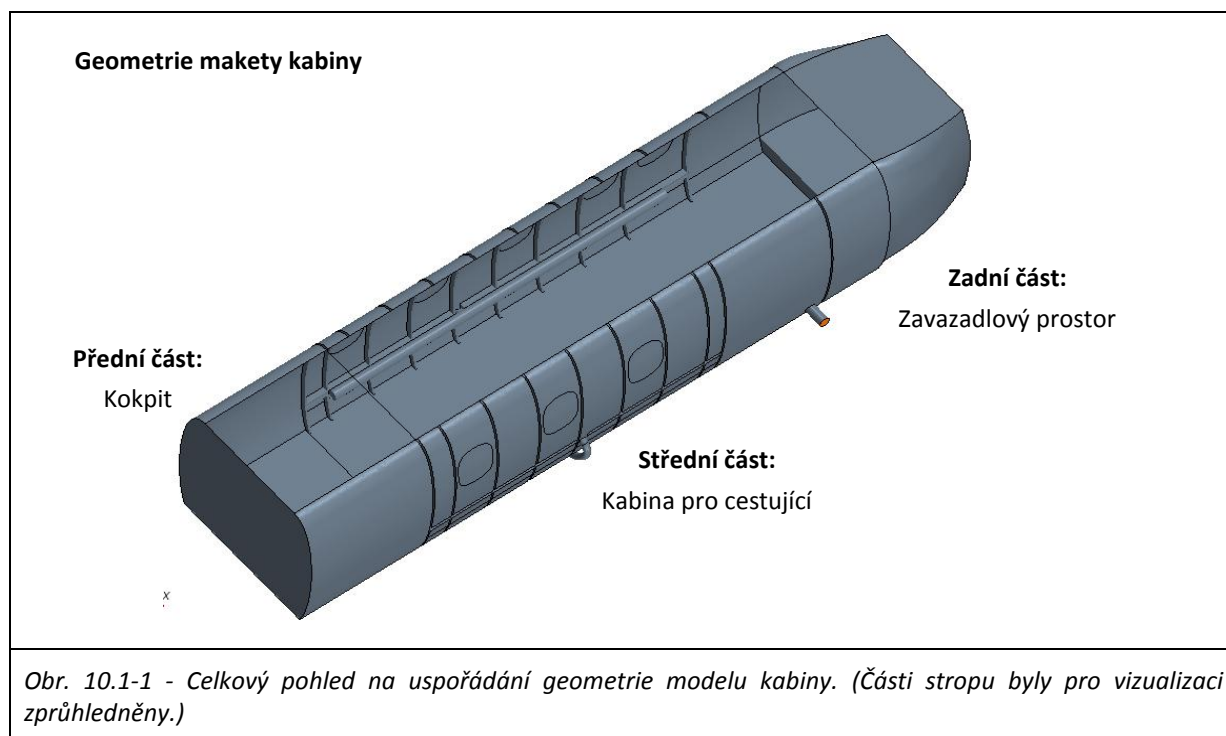
Označení případu		Případ A	U _{rel}	Případ B	U _{rel}	Případ C	U _{rel}
Okolní parametry	Jednotka		[%]		[%]		[%]
barometrický tlak	[Pa]	97 664	2,02	97 742	2,02	97 910	2,02
teplota v laboratoři	[°C]	22,7	2,55	22,81	2,53	22,52	2,57
	[K]	295,8	0,20	296,0	0,20	295,7	0,20
ref. hustota	[kg/m ³]	1,150	4,43	1,150	4,43	1,153	4,43
Vstupy (inlety)	Jednotka						
celkový průtok	[l/s]	31,2	17,97	44,5	16,61	69,2	15,61
celkový hmot. průtok	[kg/s]	0,036	37,09	0,051	34,51	0,076	32,62
teplota levý - průměr	[°C]	23,3	2,49	23,8	2,43	24,1	2,40
	[K]	296,4	0,20	297,0	0,19	297,3	0,19
teplota pravý průměr	[°C]	23,1	2,51	23,7	2,43	24,1	2,39
	[K]	296,2	0,20	296,9	0,19	297,3	0,19
průtok levý	[l/s]	13,7	17,97	19,6	16,61	30,4	15,61
rychlost levý	[m/s]	3,56	17,97	5,09	16,61	7,92	15,61
průtok pravý	[l/s]	17,4	17,97	24,9	16,61	38,8	15,61
rychlost pravý	[m/s]	4,54	17,97	6,48	16,61	10,07	15,61

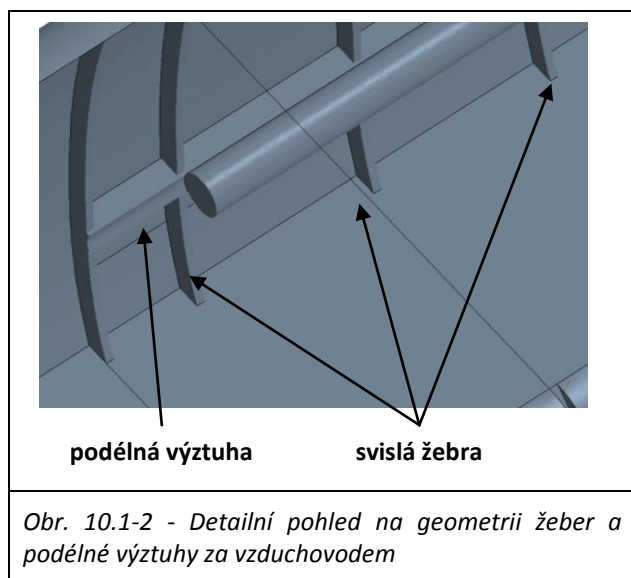
10 TVORBA A VALIDACE CFD MODELU KABINY

Kapitola je rozdělena do pěti podkapitol je především zaměřena na postup vytvoření výpočtového modelu makety kabiny letadel. Je upřesněn postup tvorby 3D geometrie modelu a sítě výpočtových buněk, definice okrajových podmínek, nastavení simulací a definování nezbytných nastavení před spuštěním simulací. Dále je popsáno, která data a jakým způsobem byla z výsledků simulací získána a v závěrečné kapitole je popsáno porovnání výsledků z měření a simulací.

10.1 Tvorba geometrie a výpočtové sítě buněk - model makety

Pro optimalizační simulace byla vytvořena geometrie vycházející z geometrie makety popsané v kapitole 9.1.1 a jako nástroj pro její tvorbu byl využit program SolidWorks 2010. Hlavní hranicí, která definuje geometrie výpočetní domény modelu kabiny jsou podlahy, strop, přepážky (přední/zadní) a potah makety. Prostor makety se skládá ze tří sekcí přední - Kokpit, střední - Kabina pro cestující a zadní - Zavazadlový prostor a tomuto dělení odpovídalo i rozdělení geometrie interiérových panelů v modelu (viz Obr. 10.1-1). Geometrie modelu plně respektovala všechny geometricky důležité detaily, které mají vliv na vývoj proudového pole v kabině - patří mezi ně především tvar a umístění hlavních vzduchovodů, tvar stěn, tvar stropu, umístění a tvar okének a v neposlední řadě i tvar a poloha jednotlivých svislých žebířů a vodorovných výztuh. V první verzi geometrie modelu nebyla žebra nosné konstrukce makety modelována, avšak při testovacích simulacích se ukázalo, že zásadním způsobem ovlivňují proudění na přechodu podlahy a stěna. Geometrie tedy byla v první verzi příliš zjednodušená, a proto byl model ve druhé verzi o svislá žebra a podélné vyztužení za vzduchovody rozšířen (viz Obr. 10.1-2).





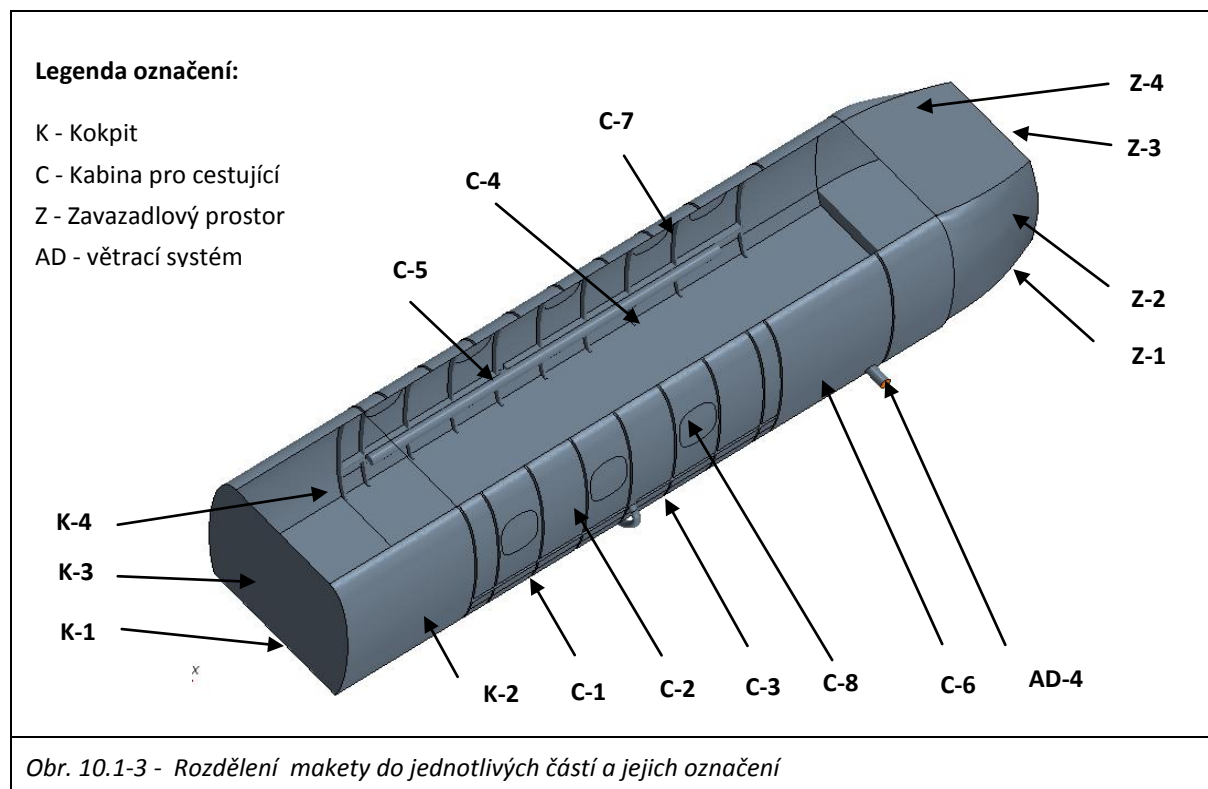
Geometrie jednotlivých hlavních sekcí makety byly rozděleny podle umístění a typu použitého materiálu následovně

Přední část - Kokpit: Příčný profil sekce je ve směru podélné osy konstantní a nejsou v něm žádné otvory. Geometrie je rozdělena do částí - Podlaha (pozice K-1), Stěny (pozice K-2), Přední přepážka (pozice K-3) a Strop (pozice K-4), (viz Obr. 10.1-3)

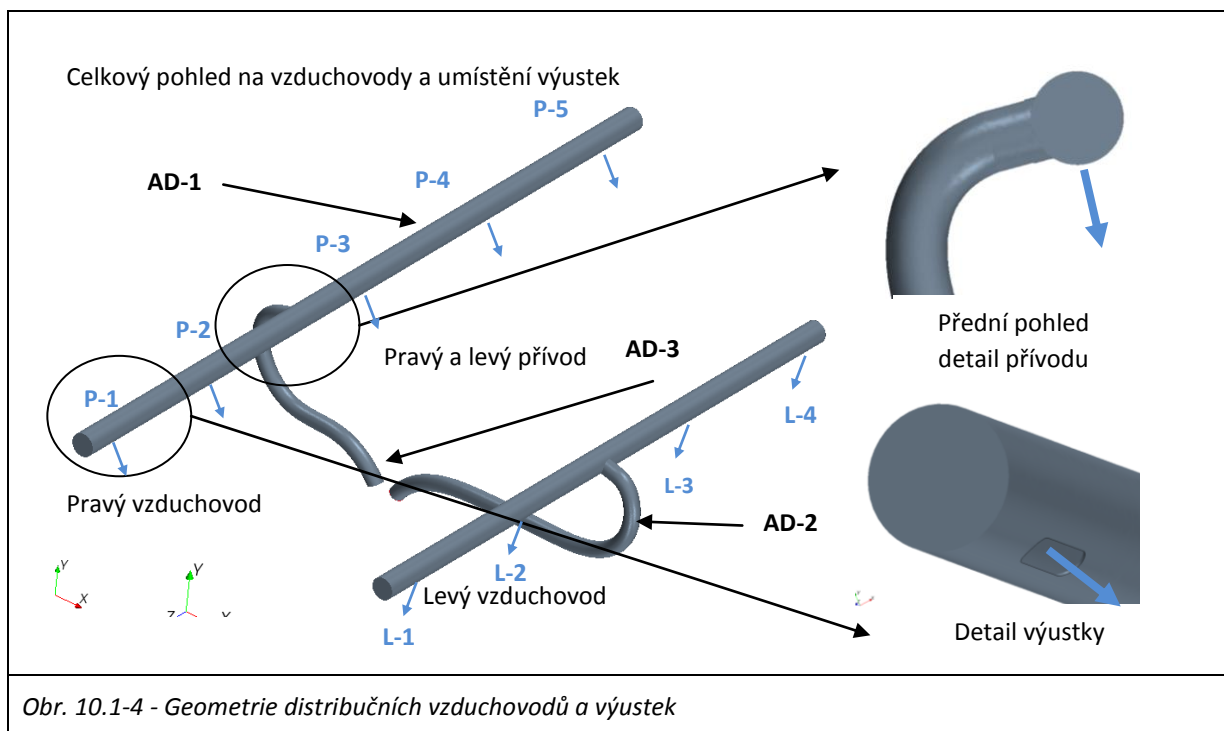
Střední část - Kabina pro cestující: Příčný profil sekce je ve směru podélné osy konstantní. Ve stěnách je modelováno osm

otvorů pro okénka, jejichž rozmístění a tvar odpovídá vybraným okénkům na maketě (pozice C-8). V této sekci je modelována i geometrie žebra a podélné výztuhy za hlavními vzduchovody (pozice C-7). Geometrie je dále rozdělena do částí - Podlaha (pozice C-1), Stěny-Horní (pozice C-2), Stěny-pod-vzduchovody (pozice C-3), Strop (pozice C-4) a Dveře (pozice C-6) (viz Obr. 10.1-3).

Zadní část - Zavazadlový prostor: Sekce Zavazadlový prostor je z velké části situována do ocasní části trupu, a proto se v příčném profilu zužuje a zmenšuje se i její světlá výška. Geometrie je rozdělena do částí - Podlaha (pozice Z-1), Stěny (pozice Z-2), Zadní přepážka (pozice Z-3) a Strop (pozice Z-4) (viz Obr. 10.1-3).



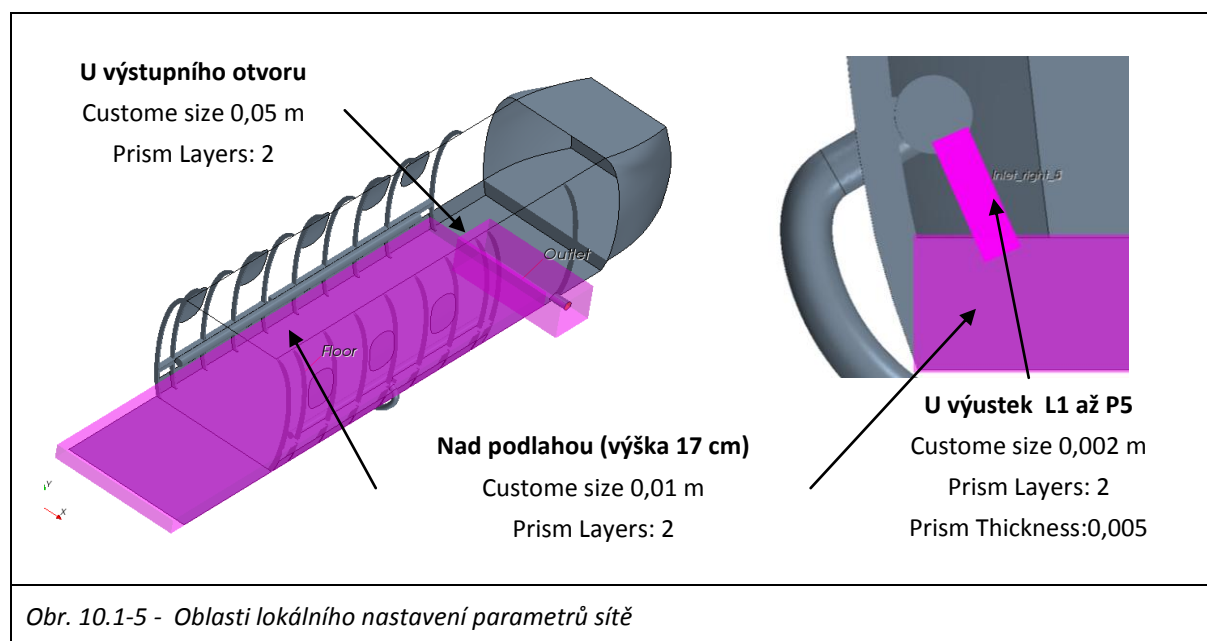
Geometrie hlavních distribučních vzduchovodů a výustek: Geometrie přívodních hadic, vzduchovodů a výustek, byla vytvořena na základě skutečných vzduchovodů realizovaných v maketě. Vzduchovody jsou kruhového průřezu s vnitřním průměrem 100 mm. Na pravý vzduchovod je napojeno celkem pět distribučních výustek označených P1 až P5 na levý vzduchovod jsou pak napojeny čtyři výustky označené L1 až L4. Výustky mají tvar oválu s délkou 100 mm a šířkou 25 mm (bližší popis viz kapitola 9.1.1.). Ve výustkách nejsou použity žádné vestavby ani krycí mřížky. Podélná rozteč mezi výustkami vycházela z reálného rozmístění výustek na vzduchovodu (viz Obr. 9.1.1-3). Mezi výustkami L-2/L-3 a P-2/P-3 je vložen příváděcí T-kus 100/70 na něž jsou napojeny přívodní hadice o průměru 70 mm. Geometrie hadic byla co nejvíce přizpůsobena vedení hadic na maketě, jak ilustrují obrázky 9.1.1-5 a 10.1-4. Konec každé hadice byla uzavřen kruhovou plochou, která byla posléze využita pro definování okrajových podmínek Pravý a Levý přívod. Základní charakteristiky geometrie jsou uvedeny na Obr. 10.1-4.



Takto definovaná a rozdělená geometrie byla použita jako základ pro vytvoření sítě výpočtových objemů (buněk). Geometrie byla importována do simulačního programu Star-CCM+ 6.02.009 firmy ADAPCO. Síť byla vytvořena z polyhedrálních buněk s nastavením síťovacího algoritmu dle tabulky 10.1-1. Hlavním cílem nastavení mesheru bylo vytvořit síť, která by byla schopna správně popsat důležité regiony a zachytit všechny fenomény důležité pro správnou predikci proudového a teplotního pole v kabině (fluktuační proudů, přísávání vzduchu do proudů, rozpad proudů, přísátí ke stěně atd.). Proto byly některé regiony sítě zjemněny, popřípadě bylo na některých částech geometrie individuálně upraveno nastavení parametrů pro vytváření prizmatické vrstvy či povrchové sítě. Místa zjemnění sítě jsou uvedena na obrázku 10.1-5, individuálními nastavení tvorby sítě pro konkrétní části je uvedeno v tabulce 10.1-2. Vytvořená síť obsahovala celkem 3 551 000 buněk.

Tab. 10.1-1 - Základní nastavení síťovacího algoritmu

Název parametru	Hodnota	Jednotka
Base Size	0,01	m
Number of Prism Layers	8	-
Prism Layer Stretching	1,5	-
Prism Layer Thickness	Relative to base	-
- Relative Size	100	%
- Absolute Size	0,01	m
Basic Curvature	36	Pts/circle
Surface Growth Rate	1,3	-
Surface Size	Relative to base	-
- Size Method	Min and Target	-
- Relative Minimum Size	250	%
- Relative Target Size	500	%
Tet/Poly Density	-	-
- Density	1	-
- Growth Factor	1,5	-



Obr. 10.1-5 - Oblasti lokálního nastavení parametrů sítě

Tab. 10.1-2 - Individuální nastavení parametrů pro tvorbu sítě

Poz.	Část	Surface size Min/Targ [m]	Prism layers [-]	Prism thickness [m]
C-3	Kabina-stěny pod vzduch.	0,0250/0,025	-	-
C-5	Kabina-kryty vzduch.	0,0025/0,010	2	0,010
C-7	Kabina-žebra	0,0025/0,010	-	-
C-8	Kabina-okna	0,0250/0,050	-	-
AD-1	Hlavní vzduchovody	0,0025/0,010	2	0,005
AD-2	Přívodní hadice.	0,0025/0,010	2	0,010
AD-3	Přívody vzduchu	0,0025/0,010	-	-
AD-4	Výstupní otvor	0,0025/0,010	-	-

10.2 Definování okrajových podmínek

Okrajové podmínky použité v modelu lze rozdělit do dvou základních skupin

- okrajové podmínky definující vlastnosti konstrukce makety - definované za základě materiálových vlastností reálné makety (souhrn vlastností viz Tab. 10.2-1)
- okrajové podmínky pro distribuci vzduchu a okolní podmínky - výsledky měření na reálné maketě (souhrn výsledků viz tabulka výsledků měření 9.3-2)

Souhrnný popis nastavení všech okrajových podmínek je uveden v tabulce 10.2-2

Tab. 10.2-1 - Parametry materiálů jednotlivých částí makety

Poz.	Část	Plocha [m ²]	Materiál [-]	Tloušťka [mm]	λ [W/mK]	R_c [m ² K/W]	U_c [W/m ² K]
K-1	Kokpit podlaha (celkem) materiál konstrukce	1,807	-	16	-	0,094	2,907
			Dřevotříska	16	0,170	0,094	-
K-2	Kokpit stěny materiál konstrukce	3,892	-	2	-	0,025	3,636
			Sololit	2	0,08	0,025	-
K-3	Kokpit přepážka materiál konstrukce	2,221	-	16	-	0,094	2,907
			Dřevotříska	16	0,170	0,094	-
K-4	Kokpit strop materiál konstrukce	1,548	-	4	-	0,050	3,333
			Sololit + karton	4	0,08	0,050	-
C-1	Kabina podlaha materiál konstrukce	6,905	-	30	-	0,150	2,500
			Překlička	30	0,200	0,150	-
C-2	Kabina stěny horní materiál konstrukce	8,520	-	2	-	0,025	3,636
			Sololit	2	0,08	0,025	-
C-3	Kabina stěny pod vzduch. materiál konstrukce	1,522	-	2	-	0,025	3,636
			Sololit	2	0,08	0,025	-
C-4	Kabina strop materiál konstrukce	5,829	-	4	-	0,050	3,333
			Sololit + karton	4	0,08	0,050	-
C-6	Kabina dveře materiál konstrukce	1,698	-	4	-	0,050	3,636
			Sololit	4	0,08	0,050	-
C-7	Kabina žebra materiál konstrukce	-	-	18	-	-	-
			Překlička	18	-	-	-
C-8	Kabina okna materiál konstrukce	-	-	4	-	0,020	3,704
			Polykarbonát	4	0,20	0,020	-
Z-1	Zavazadl. prost. podlaha materiál konstrukce	1,780	-	18	-	0,090	2,941
			Překlička	18	0,200	0,090	-
Z-2	Zavazadl. prost. stěny materiál konstrukce	2,533	-	2	-	0,025	3,636
			Sololit	2	0,08	0,025	-
Z-3	Zavazadl. prost. přepážka materiál konstrukce	1,255	-	18	-	0,090	2,941
			Překlička	18	0,200	0,090	-
Z-4	Zavazadl. prost. strop materiál konstrukce	1,207	-	4	-	0,050	3,333
			Sololit + karton	4	0,08	0,050	-

- V hodnotě U_c je u všech panelů započten součinitel přestupu tepla konvekcí na vnější straně 4 W/m²K.

Tab. 10.2-2 - Souhrnné nastavení okrajových podmínek

Poz.	Část	Typ OP	Uc [W/m ² K]	Emis. [-]	Poznámka
K-1	Kokpit podlaha	Wall	2,907	0,90	Teplota okolí dle model. případu
K-2	Kokpit stěny	Wall	3,636	0,90	Teplota okolí dle model. případu
K-3	Kokpit přepážka	Wall	2,907	0,90	Teplota okolí dle model. případu
K-4	Kokpit strop	Wall	3,333	0,90	Teplota okolí dle model. případu
C-1	Kabina podlaha	Wall	2,500	0,90	Teplota okolí dle model. případu
C-2	Kabina stěny horní	Wall	3,636	0,90	Teplota okolí dle model. případu
C-3	Kabina stěny pod vzduch.	Wall	3,636	0,90	Teplota okolí dle model. případu
C-4	Kabina strop	Wall	3,333	0,90	Teplota okolí dle model. případu
C-5	Kabina kryty vzduch.	Wall	adiabat	0,90	-
C-6	Kabina dveře	Wall	3,636	0,90	Teplota okolí dle model. případu
C-7	Kabina žebra	Wall	Adiabat	0,90	-
C-8	Kabina okna	Wall	3,704	0,80	Teplota okolí dle model. případu
Z-1	Zavazadl. prost. podlaha	Wall	2,941	0,90	Teplota okolí dle model. případu
Z-2	Zavazadl. prost. stěny	Wall	3,636	0,90	Teplota okolí dle model. případu
Z-3	Zavazadl. prost. přepážka	Wall	2,941	0,90	Teplota okolí dle model. případu
Z-4	Zavazadl. prost. strop	Wall	3,333	0,90	Teplota okolí dle model. případu
AD-1	Hlavní vzduchovody	Wall	Adiabat	-	-
AD-2	Přívodní hadice.	Wall	Adiabat	-	-
AD-3	Přívody vzduchu	Inlet	-	-	Rychlost dle modelovaného případu
AD-4	Výstupní otvor	Outlet	-	-	Target mass flow - dle model. případu

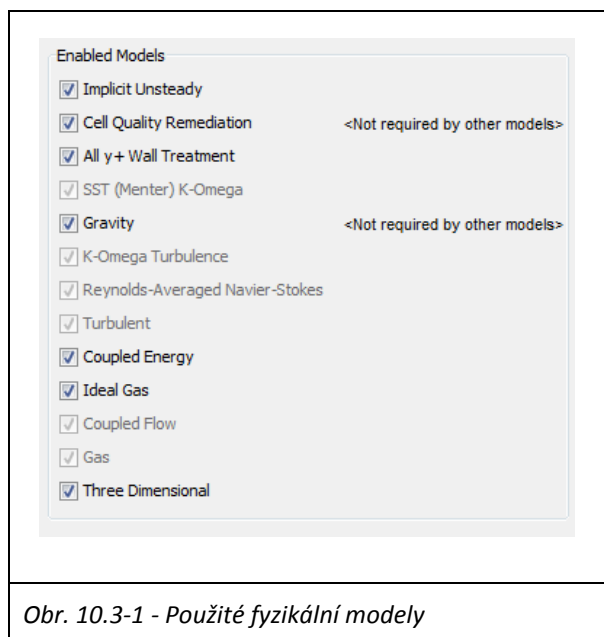
- Data pro nastavení dle modelovaného případu viz tabulka výsledků měření 9.3-2

Teploty okolí, rychlosti a teploty na vstupech pravé a levé přívodní hadice, tlak okolního vzduchu a hmotnostní průtok ve výstupním otvoru byly zadávány dle modelového případu (souhrn výsledků viz tabulka výsledků měření 9.3-2).

10.3 Preprocessing a nastavení simulací

Po vytvoření geometrie a sítě výpočtových buněk (viz Obr. 10.3-2), pokračovala tvorba modelu v následujících bodech

- Výběr fyzikálních modelů - konkrétní nastavení viz Obr. 10.3.-1
- Nastavení referenčních a počátečních hodnot fyzikálního prostředí - konkrétní nastavení viz Tab. 10.3.-1
- Definování bodů, linek, řezů, reportů a monitorů pro záznam dat a post-processing výsledků
- Nastavení parametrů řešičů a simulace
- Provedení řešení simulace



Obr. 10.3-1 - Použité fyzikální modely

Výběr fyzikálních modelů: Všechny validační simulace byly řešeny se stejnou sadou fyzikálních modelů. Na obrázku 10.3-1 je náhled okna nastavení fyzikálních modelů v programu Star-CCM+. Modely byly voleny podle doporučení z odborné literatury, zkušeností autora a vhodnosti a potřebnosti pro řešení fyzikální fenomény. Je patrné, že simulace byly řešeny jako časově závislé s délkou simulovaného času odpovídající měření, čili 300 s. Model turbulence byl zvolen K-Omega SST neboť v případě simulace makety se změna rychlostí pohybuje v rozmezí dvou řádů (rychlost se mění z řádu jednotky m/s ve vzduchovodech

na řád jednotky cm/s v prostoru kabiny) a jiné modely turbulence v prostoru s nízkými rychlostmi a zápornými tlakovými gradienty nedokážou korektně predikovat vývoj turbulence a separace proudů (MENTER, et al., 2003). Vzhledem k velké různosti rychlostí bylo také zvoleno ošetření přístěnné oblasti All y+ Wall Treatment, které umožňuje zohlednit korektní rozřešení mezní vrstvy pro přístěnné oblasti s nízkými (například stěny v kokpitu) i vysokými (např. podlaha v kabině cestujících) Reynoldsovými čísly. Hustota vzduchu byla modelována na základě stavové rovnice, což umožňuje zohlednit vztahové síly, které se uplatňují především při větrání s velkoplošnými výustkami.

Nastavení referenčních a počátečních hodnot fyzikálního prostředí: Referenční a počáteční podmínky nastavené v simulaci jsou uvedeny v tabulce 10.3-1. Hodnota referenčního barometrického tlaku, referenční hustoty a počáteční teploty vycházely z hodnot naměřených v laboratoři při experimentech (viz Tab. 9.3-2). Počáteční rychlost 0,1 m/s ve směru z přední do zadní části kabiny, byla dána umístěním odváděcího otvoru ve dveřích kabiny. Je nezbytné podotknout, že správné nastavení referenčních a počátečních podmínek je nezbytné pro korektní popis okolních podmínek, za kterých byly experimenty vykonány.

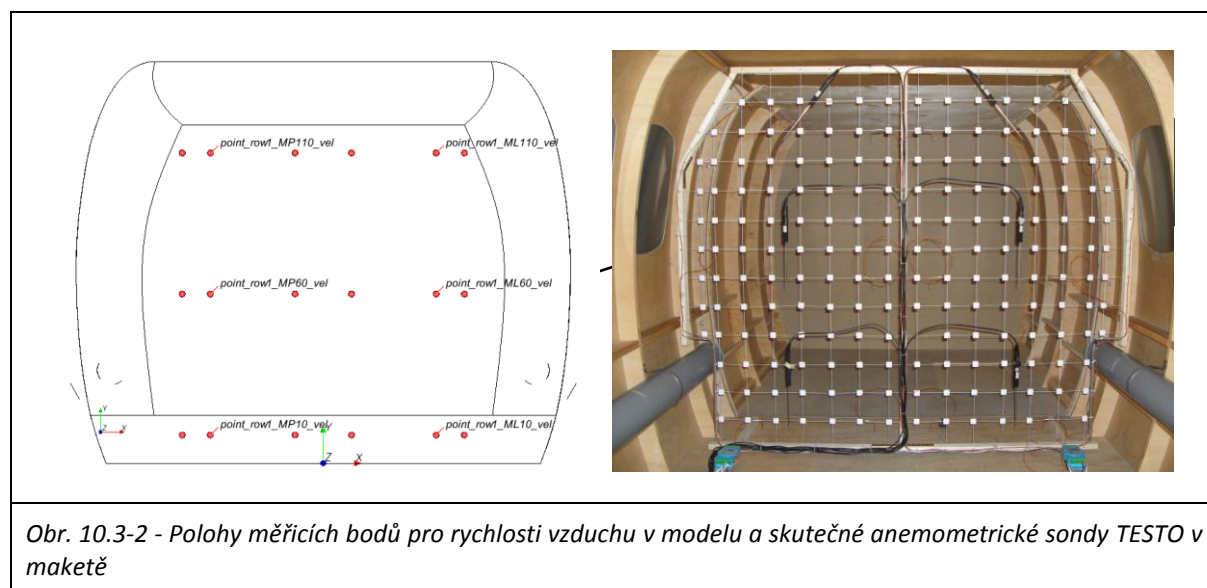
Tab. 10.3-1 Nastavení referenčních a počátečních hodnot fyzikálního prostředí

Název parametru	Hodnota	Jednotka
Referenční tlak	dle tabulky 9.3-2	Pa
Referenční směr gravitačního zrychlení	-9,81 ve směru osy y	m/s^{-2}
Referenční hustota	dle tabulky 9.3-2	kg/m^3
Počáteční teplota	dle tabulky 9.3-2	K
Počáteční rychlost	-0,1 ve směru osy z	m/s

Definování bodů, linek, řezů, reportů a monitorů pro záznam dat a post-processing výsledků: Pro záznam dat, následnou extrakci výsledků z dokončené simulace nebo monitorování průběhu řešení simulace je nezbytné vytvořit v modelu objekty (body, linky, řezy - v programu Star-CCM+ označované jako Derived parts), které charakterizují souřadnice míst, v kterých budou sledovány nebo vyhodnocovány hodnoty jednotlivých polí či simulovaných veličin. Obecně je lze popsat jako virtuální sondy/čidla. Typy objektů které byly definovány v modelech jsou vedeny v tabulce 10.3-3 a na obrázku 10.3-2 je ilustrováno typické rozmístění bodů v příčném řezu. Rozmístění jednotlivých bodů v řezu je shodné s umístěním sond na měřicí síti (viz kapitola 9.1.2) a poloha řezu pak odpovídá polohám řezů měření (viz Obr. 9.1.1-3). Všechny typy objektů, které jsou nezbytné pro záznam dat (body a reporty sloužící pro definování monitorů) je třeba vytvořit ve fázi přípravy simulace, neboť za běhu solveru a výpočtu řešení, slouží k ukládání dat, která se jinak ve výsledkovém souboru neukládají. Pro snadnější zpracování výsledků při post-processingu je dobré připravit si v průběhu příprav modelu i všechny body (a reporty) na místech, kde budou vyhodnocovány parametry polí. Zvláště u simulací jednoho modelu, kdy je simulováno velké množství modelových případů, je zpětné definování bodů a reportů až ve fázi post-processingu velice časově zdlouhavá a zbytečně se opakující činnost.

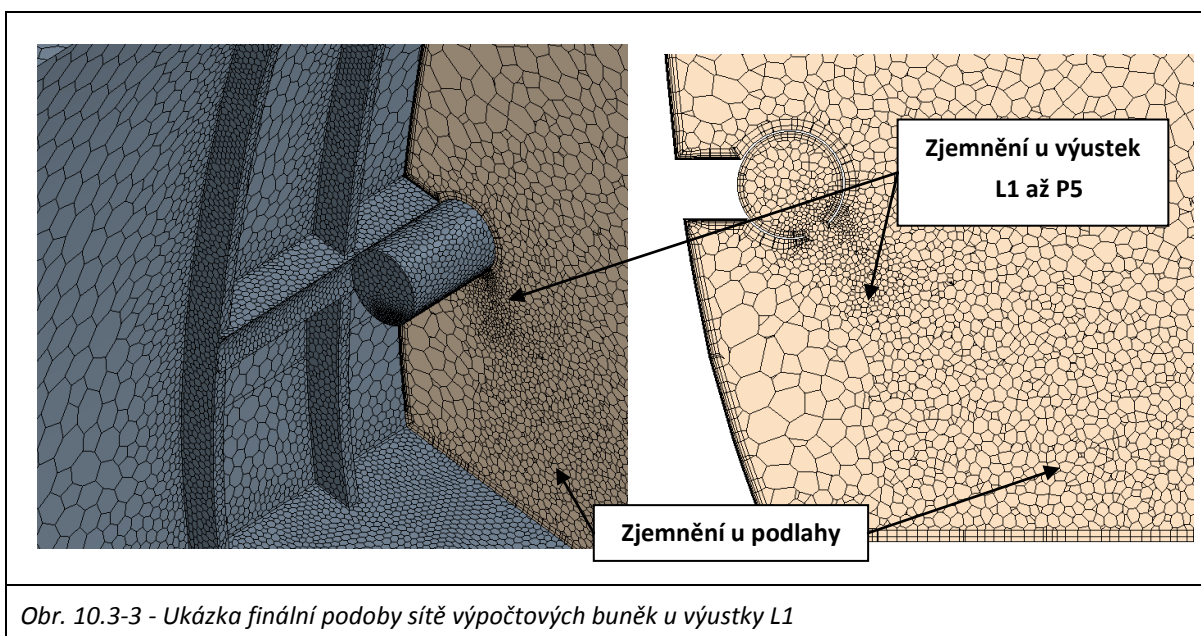
Tab. 10.3-3 Objekty pro záznam a extrakci dat použité v modelu

Název objektu a měřený parametr	Počet	Jednotka
Point - měření teploty	123	K
Point - měření magnitudy rychlosti	30	m/s
Report +monitor - teplota	123	K
Report +monitor-magnituda rychlosti	30	m/s
Ostatní reporty	50	s, W, W/m ² , m ³ /s
Řezy	15	
Scény a pohledy	28	



Obr. 10.3-2 - Polohy měřicích bodů pro rychlosti vzduchu v modelu a skutečné anemometrické sondy TESTO v maketě

Nastavení parametrů řešičů a simulace: U časově závislých CFD simulací je především nezbytné korektně nastavit délku časového kroku, které vychází z tzv. Courantova čísla. Nejprve byl nastaven časový krok na délku 0,005 s, ovšem docházelo k pádům simulace, neboť vzhledem ke kmitání primárních proudů byla v jistých časech simulace překračována mezní hodnota kontrolní podmínka časové stability výpočtu (CFL Courant-Friedrich-Lewyho kritérium stability). Proto byla aktivována možnost dynamického přizpůsobování délky časového kroku (volba Courant Number Ramp v nastavení Coupled solveru) v závislosti na CFL, což problém se stabilitou vyřešilo. Ostatní parametry nastavení řešičů byly ponechány v původním nastavení. Kritéria řídící průběh a ukončení simulace (tzv. Stopping criteria) byla nastavena následovně - Maximum Physical Time: 300s, Maximum Inner Iterations: 10, Continuity Criterion a Energy Criterion: 0,001, X-momentum Criterion a Y-momentum Criterion a Z-momentum Criterion: 0,0001.



Provedení řešení simulace: Výpočty simulací byly provedeny na výpočetním clusteru Gaston (112 CPU v době zpracování simulací) a jednotlivé simulace běžely vždy na 16 CPU. I přes relativní mohutnost nasazeného výpočetního hardware, byla délka výpočtu u validačních simulací v průměru 21 dní na jednu simulaci. Výsledky byly ukládány v podobě datových řad na definovaných monitorovacích bodech, byla ukládána průměrná pole rychlosti, teploty, a veličiny popisující turbulenci. Pro kvalitativní vyhodnocení časového vývoje polí, byly s časovým krokem 1 s ukládány náhledy všech definovaných řezů a pohledů v podobě obrázků ve formátu PNG. Výsledná velikost získaných souborů byla cca 15 GB pro validační simulace a 223 GB pro optimalizační simulace uvedené v kapitole 11.

10.4 Postprocessing výsledků

Po úspěšném dokončení běhu řešiče simulace, byla data stažena z výpočetního clusteru Gaston na pracovní stanici autora a byl proveden tzv. postprocessing získaných dat. Pojmem postprocessing se označují souhrnně činnosti zpracování dat získaných ze simulace do formy a podoby následně zpracovatelné dalšími analytickými nástroji nebo vytvoření řezů a náhledů polí pro kvalitativní vyhodnocení a prezentaci získaných výsledků. Program Star-CCM+ disponuje celou řadou nástrojů a možností pro extrakci kvalitativních i kvantitativních výsledků. Jak již bylo uvedeno v předešlé kapitole ve fázi postprocessingu výsledků simulací se nejvíce projeví kvalita přípravy objektů (bodů, reportů, linek, řezů a pohledů) pro zpracování dat. Pokud nejsou v případě parametrických studií, kdy je většinou najednou řešeno několik desítek modelových případů tyto objekty kvalitně připraveny předem, je jich definování až ve fázi postprocessingu zdlouhavé, pracné a také bývá často zdrojem chyb.

Pro extrakci dat byly využity objekty uvedené v tabulce 10.3-3 a navíc vyhodnocení a uložení výsledků bylo automatizováno prostřednictvím maker vytvořených v programovacím jazyce JAVA, v kterém je i celý program CCM+ napsán. Využití maker podstatně usnadnilo fázi postprocessingu a průměrné zpracování jednoho modelového případu zabralo cca 30 min. Pokud by nebylo využito maker trvalo by tzv. "ruční" extrakce výsledků několikanásobně déle, neboť z každého modelového případu bylo uloženo:

Pro validační simulace:

- časový záznam hodnot na všech rychlostních a teplotních sondách
- řezy teplotního pole, proudového pole a pole indexu stáří vzduchu

Pro optimalizační simulace :

- cca 27 řezů polí
- hodnoty tepelných toků na figurínách
- hodnoty indexu stáří vzduchu

Další zpracování dat bylo provedeno pomocí programu Microsoft Excel 2007, v něm byly z extrahovaných dat provedeny analýzy a vytvořeny grafy a diagramy komfortních zón. Souhrnné grafy pro validační simulace jsou uvedeny v následující kapitole 10.5, výsledky optimalizačních simulací jsou uvedeny v kapitole 11.

10.5 Porovnání výsledků z měření a simulací - souhrn

V podkapitole je uveden souhrn porovnání výsledků získaných z měření a validačních simulací pro všechny modelové případy (kompletní výsledky viz Příloha I.). Jsou uvedeny grafy pro teploty vzduchu (viz Tab. 10.5-1) a rychlosti proudění vzduchu (viz Tab. 10.5-2 a Obr. 10.5-1). Souhrnné výsledky jsou prezentovány vždy jako průměr ze tří hodnot, které jsou roztrženy do skupin příslušející do prostoru jednotlivých sedadel (např. hodnota pro sedadlo L1 v grafech tabulky 10.5-1 reprezentuje průměrnou teplotu v prostoru sedadla L1 a je vypočtena z hodnot ve výškách 10, 60 a 110 cm nad podlahou).

V grafech tabulky 10.5-1 jsou porovnány průměrné teploty pro modelové případy A, B a C. Z grafů je patrné, že výsledky získané z měření a simulací vykazují velice dobrou shodu a pokud se zohlední nejistoty měření jsou prakticky shodné. Tento výsledek je velice důležitý pro validaci modelu a pro další využití v optimalizaci vnitřního prostředí, neboť teplota prostředí je jedním z nejdůležitějších parametrů ovlivňujících tepelnou pohodu v kabině. Na druhou stranu je třeba podotknout, že validace byla provedena jen pro mírně neizotermní případy, neboť z důvodů popsaných v kapitole 9.2 nebylo možné měřit režimy vytápění či chlazení. Z grafů Přílohy I pro teploty je také patrné, že se v kabině vyskytuje výšková teplotní stratifikace, která není simulací zcela korektně zachycena.

V grafech tabulky 10.5-2 jsou porovnány průměrné rychlosti proudění vzduchu pro modelové případy A, B a C. Z grafů je patrné, že výsledky získané z měření a simulací vykazují dobrou shodu především pro první, čtvrtou a pátou řadu a také pro prostor sedadla L2 a R3. Naopak relativně velkých rozdílů je dosahováno v prostoru sedadel R2 a L3, kdy především pro modelový případ C predikuje simulace přibližně dvojnásobnou průměrnou rychlost proudění než jaká byla změřena při experimentu. Tento efekt může být způsoben především třemi skutečnostmi

- 1) oblast řad dva a tři se nachází mimo osy primární proudů a simulace vlivem numerické difuze není schopna přesně predikovat hodnoty rychlosti proudění.
- 2) Anemometrická sonda využívající jako měřicí element žhavenou kuličku, která má různou směrovou citlivost a může tak nadhodnocovat či potlačovat složky vektoru rychlosti, především pokud je shodný se směrem rukojeti-dříku sondy. V simulaci tato situace nenastává, neboť měřicí bod je reprezentován pouze souřadnicemi a magnituda rychlosti je vypočtena jako průměr hodnot magnitud vektorů rychlosti v okolních uzlových bodech sítě.
- 3) Měřené hodnoty rychlostí proudění se dle údajů výrobce pohybují na spodním okraji měřicího rozsahu anemometrických sond (dle výrobce 0 až 10 m/s) což může mít vliv na exaktnost měření. V době měření na maketě však byl přístroj TESTO 454 jediným přístrojem na pracovišti autora, který umožňoval současné měření rychlostí proudění pro 6 samostatných kanálů. Přesnější přístroje byly k dispozici pouze s jednou sondou, což by neumožňovalo časově efektivní celkové měření v jednom řezu a vyžadovalo by sofistikované a nákladné polohovací zařízení.

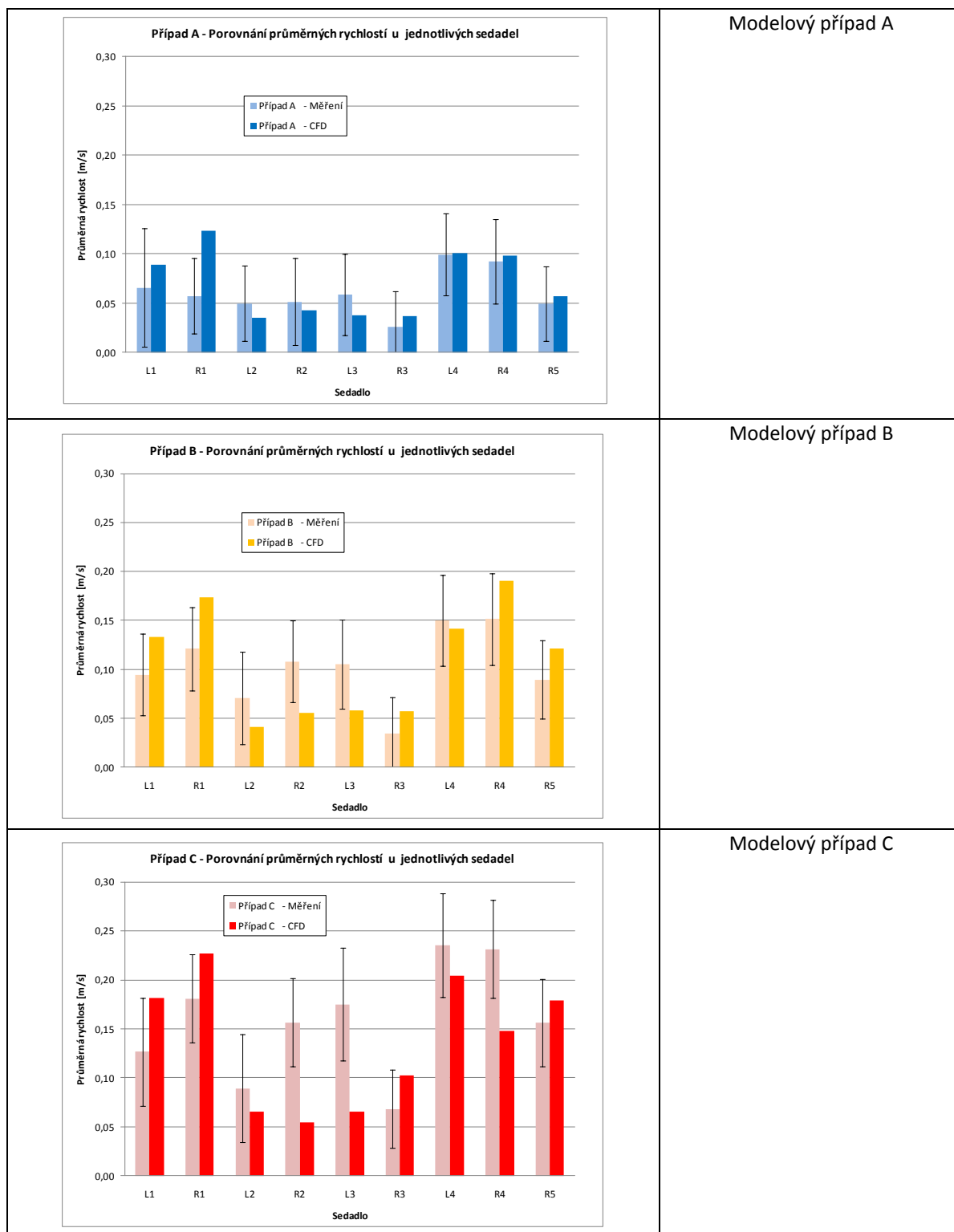
Porovnání průměrných hodnot rychlostí vzduchu pro všechny polohy sedadel a všechny měřené a simulované případy je uvedeno na obrázku 10.5-1. V tomto souhrnném

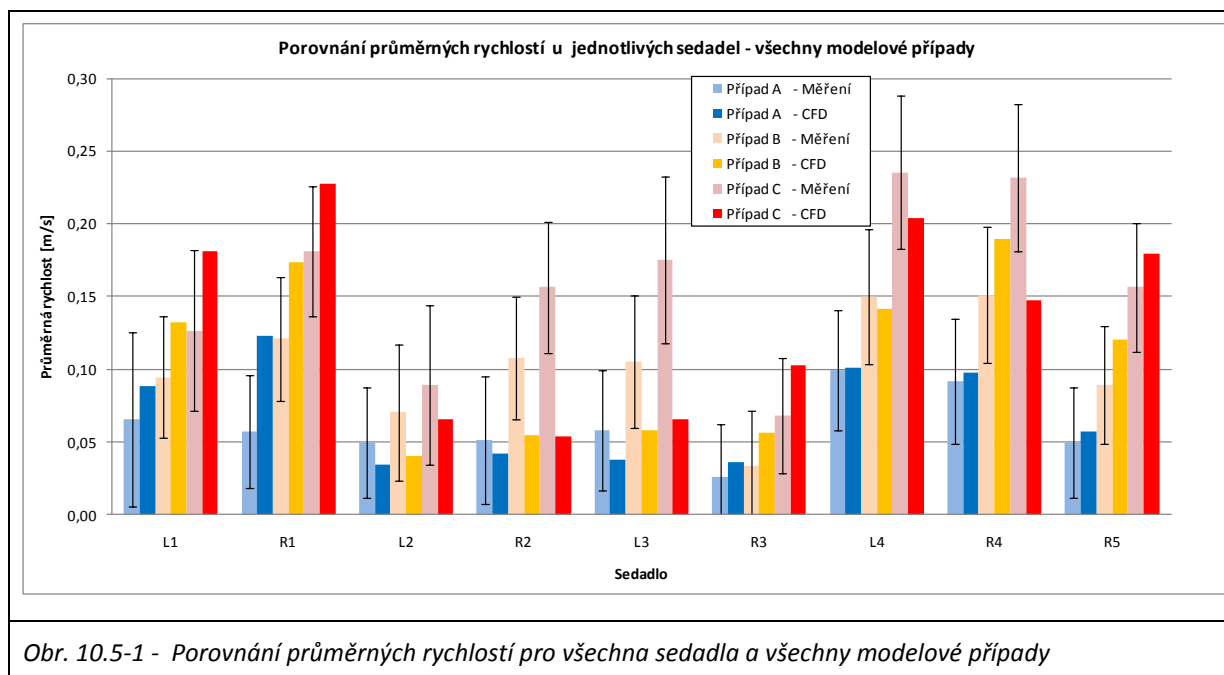
pohledu je dobře patrné, že hodnoty predikované simulacemi zachovávají stejný trend jako hodnoty z měření. Jak již bylo uvedeno, především v řadě druhé a třetí je shoda výsledků horší, v první, čtvrté a páté je shoda dobrá a relativní rozdíl je do 25 %.

Tab. 10.5-1 Porovnání teplot vzduchu z měření a simulace - pro modelové případy A, B a C

<p>Případ A - Porovnání průměrných teplot u jednotlivých sedadel</p> <p>Průměrná teplota [°C]</p> <p>Sedadlo</p> <p> ■ Případ A - Měření ■ Případ A - CFD </p>	Modelový případ A
<p>Případ B - Porovnání průměrných teplot u jednotlivých sedadel</p> <p>Průměrná teplota [°C]</p> <p>Sedadlo</p> <p> ■ Případ B - Měření ■ Případ B - CFD </p>	Modelový případ B
<p>Případ C - Porovnání průměrných teplot u jednotlivých sedadel</p> <p>Průměrná teplota [°C]</p> <p>Sedadlo</p> <p> ■ Případ C - Měření ■ Případ C - CFD </p>	Modelový případ C

Tab. 10.5-2 Porovnání výsledků rychlostí proudění vzduchu z měření a simulace - pro modelové případy A, B a C





Obr. 10.5-1 - Porovnání průměrných rychlostí pro všechna sedadla a všechny modelové případy

Shrnutí výsledků porovnání:

Z výsledků uvedených v grafech kapitoly 10.5 vyplývá, že predikce teploty vzduchu ze simulací je ve shodě s hodnotami získanými měření v maketě kabiny. Model byl v tomto ohledu pro zvolené podmínky plně validován, avšak s přihlédnutím k faktu, že měřeny byly pouze mírně neizotermní podmínky a predikce výškové stratifikace je dosti omezená (viz příloha I).

Predikce magnitudy rychlosti proudění vzduchu získaná ze simulací vykazuje dobrou shodu s měřeními v řadách jedna, čtyři a pět a na sedadlech L2 a R3. Jedná se o oblasti primárních proudů, kde je pravděpodobně simulace schopna lépe popsat šíření proudů a nedochází vlivem numerické difuze k rychlému utlumení proudění. V oblastech sedadel R2 a L3 je rozdíl mezi predikovanými a naměřenými hodnotami vyšší a relativní rozdíl dosahuje v některých případech i hodnoty vyšší než 100 %. Důležitou skutečností je však fakt, že výsledky simulací mají stejný trend jako výsledky z měření a kvalitativně tak relativně dobře predikují výslednou podobu proudového pole v kabině. Dále je také potřeba podotknout, že značný rozdíl průměrných hodnot způsobuje nesoulad měřených a simulovaných dat vždy pouze v jednom bodě (pro sedadlo R2 bod MP110, pro sedadlo L3 bod ML 10 - viz Příloha I - případ B a C) zatímco v ostatních dvou bodech je shoda dobrá.

Model byl tedy v ohledu predikce magnitudy rychlosti proudění validován pro první, čtvrtou a pátou řadu. U řad dva a tři je nezbytné při vyhodnocení výsledů zohlednit nesoulad predikce modelu s měřeními na sedadle R2 - výška hlavy (bod MP110), L3 - výška kotníků (bod ML10) a lze tedy říci, že model byl pro tyto oblasti plně validován v oblasti kvalitativní predikce a podmíněně validován v oblasti kvantitativní predikce.

11 OPTIMALIZACE PROSTŘEDÍ V KABINĚ

Tato kapitola pojednává v pěti podkapitolách o zvolených typech optimalizace pro kabiny letadel s pohledu technických řešení a opatření, které mohou ovlivnit/řídít některé mikroklimatické parametry vnitřního prostředí. Autorem byla zvolena pro optimalizaci jen taková řešení, která jsou realizovatelná s ohledem na technická, ekonomická a bezpečnostní omezení vyplývající se zaměřením práce na kabiny malých dopravních letadel. V podkapitolách 11.3, 11.4, 11.5 a 11.6 jsou poté rozebrány a vyhodnoceny výsledky a vlivy jednotlivých opatření na mikroklima a tepelnou pohodu cestujících v kabině. V kapitole 11.2 je podrobně popsána geometrie modelu a nastavení okrajových podmínek. Pokud není uvedeno jinak, jsou parametry modelu shodné s parametry uvedenými v kapitole 10.

11.1 Optimalizovaná technická řešení a definované modelové případy

Pro optimalizaci prostředí v kabině dopravního letadla byly na základě teoretické části práce a praktických zkušeností identifikovány následující okruhy technických přístupů a opatření s cílem dosáhnout jejich optimalizací nejlepší kvalitu větrání a tepelné pohody.

- **Distribuce větracího vzduchu**
- **Geometrie distribučních vzduchovodů**
- **Tloušťka tepelné izolace**
- **Emisivity vnitřních povrchů**

Distribuce větracího vzduchu - Na základě literárních zdrojů i osobních poznatků autora byly pro optimalizaci distribuce vzduchu vybrány následující typy distribuce větracího vzduchu.

- **Klasické směšovací větrání**

Klasické směšovací větrání je realizováno pomocí původních testovacích vzduchovodů s výstky oválného průřezu, které přivádějí větrací vzduch pouze směrem k podlaze a nohám cestujících. Podrobnější výsledky k tomuto principu distribuce viz kapitola 11.3.1.

- **Modifikované směšovací větrání**

Modifikované směšovací větrání je realizováno pomocí vzduchovodů s obdélníkovým průřezem a výstky oválného průřezu. Výstky jsou však zdvojeny a větrací vzduch je tak přiváděn nejen směrem k podlaze, ale i směrem ke stěnám kabiny a okénkům. Podrobnější výsledky k tomuto principu distribuce viz kapitola 11.3.2.

- **Větrání s velkoplošnou výstkou**

Koncept distribuce vzduchu velkoplošnou výstkou byl realizován pomocí velkoplošné výstky umístěné v podlaze kabiny v prostoru uličky mezi sedadly. Podrobnější výsledky k tomuto principu distribuce viz kapitola 11.3.3.

Geometrie distribučních vzduchovodů - Předešlé práce autora [XVI] i jiné zdroje (SKOVGAARD, a další, 1991), (KUZNIK, a další, 2005), (HUO, a další, 2000) odhalily, zásadní vliv tvaru distribučních vzduchovodů na výsledné proudové pole, které je generováno větracím systémem. Pro optimalizaci byly vybrány tedy následující možnosti modifikací geometrie hlavních přírodních vzduchovodů.

- Připojení vzduchovodu ve středu T kusem
- Připojení vzduchovodu v zadní části T kusem
- Přímé připojení v zadní části
- Přímé připojení v přední části
- Modifikace umístění a tvaru výustek u Modifikovaného směšovacího větrání

Podrobné výsledky viz kapitola 11.4 Optimalizace geometrie distribučních vzduchovodů

Tloušťka tepelné izolace - Nezanedbatelný vliv na střední radiační teplotu a tím i tepelnou pohodu v kabině má tloušťka tepelné izolace stěn kabiny. Pro optimalizaci byly vybrány tedy následující možnosti modifikací tloušťky izolace stěn kabiny.

- Minimální izolace $U = 59,4 \text{ W/K}$
- Střední izolace $U = 44,7 \text{ W/K}$
- Vysoká izolace $U = 37,2 \text{ W/K}$
- Maximální izolace $U = 33,8 \text{ W/K}$

Podrobné výsledky viz kapitola 11.5 Optimalizace tloušťky tepelné izolace

Emisivity vnitřních povrchů - Posledním typem zvolené optimalizace byl vliv emisivity vnitřních povrchů kabiny na tepelnou pohodu cestujících. Pro optimalizaci byly vybrány následující možnosti modifikací emisivity materiálů stěn kabiny

- Nízká emisivita $\varepsilon = 0,2$
- Střední emisivita $\varepsilon = 0,6$
- Vysoká emisivita $\varepsilon = 0,9$

Podrobné výsledky viz kapitola 11.6 Optimalizace vlastností interiéru - emisivita povrchů

Na základě identifikovaných okruhů byly vytvořeny základní skupiny matice modelových případů (viz Tab. 11.1-1).

Tab. 11.1-1 - Základní skupiny matice modelových případů

Skupina optimalizace	Název	Zkrácený název
Distribuce větracího vzduchu	Optimalizační skupina 1	OPT 1
Geometrie distribučních vzduchovodů	Optimalizační skupina 2	OPT 2
Tloušťka tepelné izolace	Optimalizační skupina 3	OPT 3
Emisivity vnitřních povrchů	Optimalizační skupina 4	OPT 4

Dále bylo třeba pro určení konkrétních okrajových podmínek stanovit za jakých provozních a klimatických podmínek bude vyšetřován vliv jednotlivých opatření na mikroklima v kabině. Vzhledem k tomu, že množství kombinací modelových případů roste geometricky s počtem zvolených parametrů, bylo z praktického hlediska vhodné (a někdy i nutné) omezit množství zkoumaných parametrů, nebo některé kombinace parametrů vyloučit. Příklad první rozvahy u definování provozních a klimatických podmínek uvádí tabulka 11.1-2. Tento počet parametrů by vedl na celkem 18 modelových případů v každé podskupině, čtyř základních optimalizačních skupin. To by znamenalo celkové množství 252 modelových případů

OPT1: $3 \times 18 = 54$, **OPT 2:** $4 \times 18 = 72$, **OPT 3:** $4 \times 18 = 72$, **OPT 4:** $3 \times 18 = 54$

Celkem tedy: $54 + 72 + 72 + 54 = 252$ jednotlivých modelových případů.

Takové množství modelových případů však značně komplikuje možnosti vyhodnocení výsledků a definování jasných závěrů, neboť množství dat a informací je poté enormní a prakticky nezpracovatelné.

Tab. 11.1-2 - Prvotní návrh okolních a provozních podmínek

Obsazenost [osoby]	Teplota okolí [°C]	Provoz [-]
0	- 25	Pozemní
5	+15	Letový
9	+35	-

Proto byly provozní a klimatické podmínky omezeny následovně (viz Tab. 11.1-3). Obsazenost kabiny byla zredukována pouze na případ polovičního obsazení, kdy jsou plně obsazeny řady 1, 3 a 5, neboť toto rozmístění osob umožňuje vyšetřit vliv jednotlivých opatření v různých částech kabiny (přední, prostřední a zadní část). Teploty okolí byly ponechány beze změny a provozní podmínky byly zredukovány na případ pozemního provozu, kdy letadlo stojí na letišti. Provoz na letišti byl zvolen především s ohledem na skutečnost, že výsledky práce budou dále sloužit jako podklady pro rozvoj dané problematiky na pracovišti autora a veškeré případné navazující měření a ověřování bude možné uskutečnit pouze v podmínkách simulovaného pozemního provozu na maketě v laboratoři. Měření za letových podmínek je možné uskutečnit pouze na reálném letadle a při reálném letu, avšak takové měření je prakticky neproveditelné jak z hlediska vysoké ekonomické náročnosti tak s ohledem na přísná bezpečnostní opatření v kabinách letadel (rušení systémů letadla měřicími přístroji, přísné předpisy dozorových orgánů atd.)

Tab. 11.1-3 - Redukovaný návrh okolních a provozních podmínek

Obsazenost [osoby]	Teplota okolí [°C]	Provoz [-]
-	- 25	Pozemní
5	+15	-
-	+35	-

Jednotlivé základní skupiny pak byly rozčleněny do podskupin podle zvolených vyšetřovaných kritérií, okolních a provozních podmínek. Například pro základní skupinu OPT1 byly vybrány tři druhy distribuce a tyto tři druhy distribuce byly vyšetřovány pro tři druhy teploty okolního prostředí. To vede k celkem 9 samostatným modelovým případům ve skupině OPT1 viz tabulka Tab. 11.1-4.

Tab. 11.1-4 - Členění Skupiny OPT 1 - Označení podskupin a modelových případů

Hlavní skupina	Podskupina	Případ	Hlavní atributy případu
OPT 1 Vliv typu distribuce	A-Mix-Normal	A01	teplota okolí -25 °C
		A02	teplota okolí +15 °C
		A03	teplota okolí +35 °C
	B-Mix-Modif	B01	teplota okolí -25 °C
		B02	teplota okolí +15 °C
		B03	teplota okolí +35 °C
	C-Velkoplošná	C01	teplota okolí -25 °C
		C02	teplota okolí +15 °C
		C03	teplota okolí +35 °C

Celkový počet modelových případů OPT1: $3 \times 3 = 9$ jednotlivých případů

Ze zkušeností autora vyplývá, že strukturované rozdělení je nezbytné především pro udržení přehlednosti matice modelových případů z níž se poté odvozuje celkový počet simulací, jejich jednoznačné pojmenování, navazující výpočty, nastavení okrajových podmínek a pojmenování a uložení výsledků simulací na datovém médiu. Obdobně jako skupina OPT1 pak byly také rozčleněny ostatní základní skupiny do modelových případů (viz Tab 11.1-5, 11.1-6 a 11.1-7)

Tab. 11.1-5 - Členění skupiny OPT 2 - Označení podskupin a modelových případů

Hlavní skupina	Podskupina	Případ	Hlavní atributy případu
OPT 2 Vliv geometrie vzduchovodů	A-Mix-Normal	A02	teplota okolí +15 °C, přívod: zadní T-kus
	B-Mix-Modif	B02	teplota okolí +15 °C, přívod: zadní T-kus
	D-Mix-Modif	D01	teplota okolí -25 °C, prodloužené výustky
		D02	teplota okolí 15 °C, prodloužené výustky
	E-Mix-Modif	E01	teplota okolí -25 °C, střídavé umístění
		E02	teplota okolí +15 °C, střídavé umístění
	F-Mix-Modif	F02	teplota okolí +15 °C, přívod: zadní přímý
	F-Mix-Modif	G01	teplota okolí -25 °C, přívod: přední přímý
		G02	teplota okolí +15 °C, přívod: přední přímý

Celkový počet modelových případů OPT2: 9 jednotlivých případů

Tab. 11.1-6 - Členění skupiny OPT 3 - Označení podskupin a modelových případů

Hlavní skupina	Podskupina	Případ	Hlavní atributy případu
OPT 3 Vliv izolace stěn kabiny	A-Mix-Normal	A01	Minimální izolace, -25 °C
		A02	Minimální izolace, +35 °C
		A03	Střední izolace, -25 °C
		A04	Střední izolace, +35 °C
	B-Mix-Modif	B01	Minimální izolace, -25 °C
		B02	Minimální izolace, +35 °C
		B03	Střední izolace, -25 °C
		B04	Střední izolace, +35 °C
	C-Velkoplošná	C01	Minimální izolace, -25 °C
		C02	Minimální izolace, +35 °C
		C03	Střední izolace, -25 °C
		C04	Střední izolace, +35 °C
		C07	Maximální izolace, -25 °C
		C08	Maximální izolace, +35 °C

Celkový počet modelových případů OPT3: $3 \times 4 + 2 = 14$ jednotlivých případů

Tab. 11.1-7 - Členění skupiny OPT 4 - Označení podskupin a modelových případů

Hlavní skupina	Podskupina	Případ	Hlavní atributy případu
OPT 4 Vliv emisivity vnitřních povrchů	A-Mix-Normal	A01	Vysoká izolace, Nízká emisivita, -25 °C
		A02	Vysoká izolace, Nízká emisivita, +35 °C
		A03	Vysoká izolace, Střední emisivita, -25 °C
		A04	Vysoká izolace, Střední emisivita, +35 °C
		A05	Minimální izolace, Nízká emisivita, -25 °C
		A06	Minimální izolace, Nízká emisivita, +35 °C
	B-Mix-Modif	B01	Vysoká izolace, Nízká emisivita, -25 °C
		B02	Vysoká izolace, Nízká emisivita, +35 °C
		B03	Vysoká izolace, Střední emisivita, -25 °C
		B04	Vysoká izolace, Střední emisivita, +35 °C
		B05	Minimální izolace, Nízká emisivita, -25 °C
		B06	Minimální izolace, Nízká emisivita, +35 °C
	C-Velkoplošná	C01	Vysoká izolace, Nízká emisivita, -25 °C
		C02	Vysoká izolace, Nízká emisivita, +35 °C
		C03	Vysoká izolace, Střední emisivita, -25 °C
		C04	Vysoká izolace, Střední emisivita, +35 °C
		C05	Minimální izolace, Nízká emisivita, -25 °C
		C06	Minimální izolace, Nízká emisivita, +35 °C

Celkový počet modelových případů OPT4: $3 \times 6 = 18$ jednotlivých případů

Celkem byl definován následující počet modelových případů. OPT1: $3 \times 3 = 9$, OPT2: **9**, OPT3: $3 \times 4 + 2 = 14$ a OPT4: $3 \times 6 = 18$ Celkem: $9 + 9 + 14 + 18 = 50$ modelových případů což vede na **50** jednotlivých simulací. Z tabulek je patrné, že některé kombinace se v různých skupinách prolínají a není je tedy potřeba řešit opakovaně. Ve vyhodnocení a porovnáních jsou pak použity výsledky simulací s odpovídající kombinací okolních a provozních podmínek (viz Tab.11.1-8).

Tab. 11.1-8 - Označení opakujících se nastavení okrajových a provozních podmínek

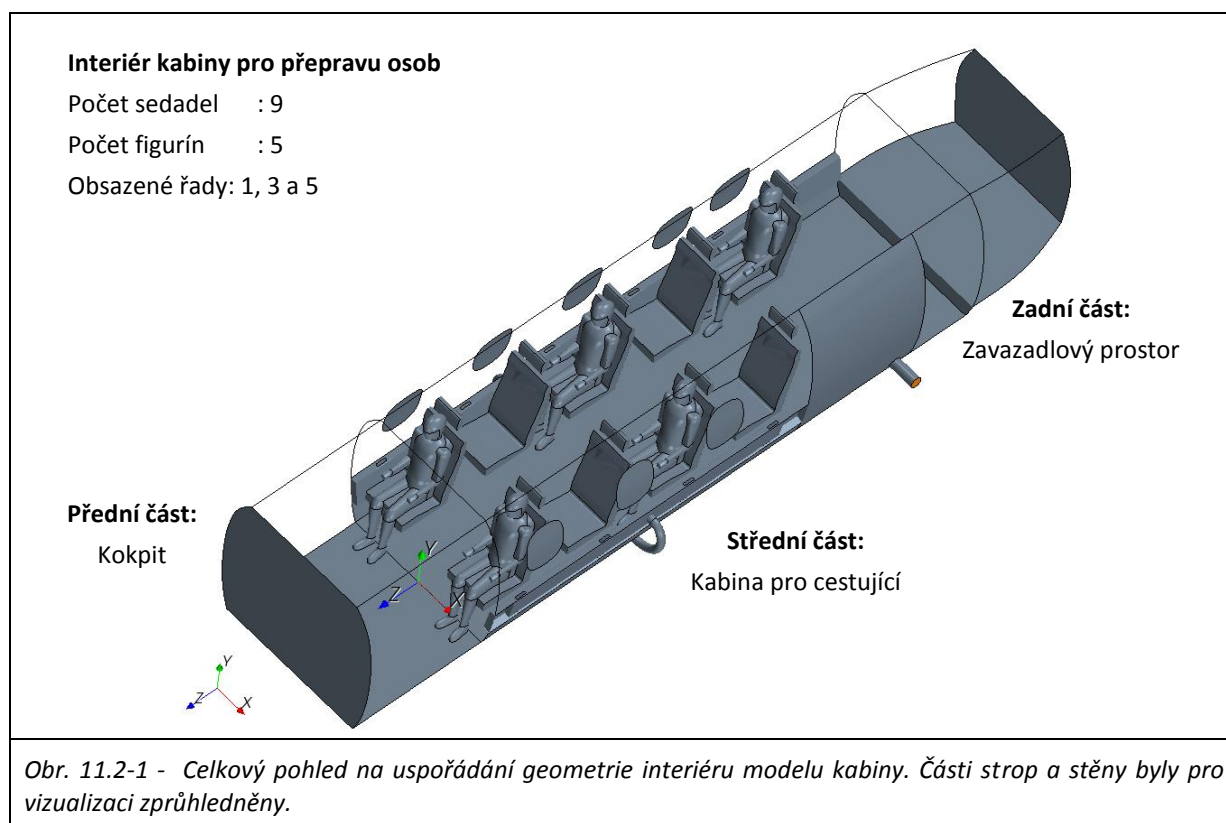
Skupina				
OPT1 - Distribuce	Mix-Normal	Mix-Modif	Velkoplošná	-
OPT2 - Geometrie	Střed - T kus (OPT1)	Konec - T kus	Přední	Zadní
OPT3 - Izolace	Nízká	Střední	Vysoká (OPT1)	Maximální
OPT4 - Emisivity	Nízká	Střední	Vysoká (OPT1)	-

Přesná rozvaha a uvážlivé definování kombinací podmínek a z nich vyplývajících modelových případů je nezbytné i z hlediska skutečnosti, že vliv některých opatření na vnitřní mikroklima kabiny je patrný pouze při určitých kombinacích okolních, provozních a konstrukčních podmínek. Z toho důvodu byly v některých hlavních skupinách vybrány jen perspektivní kombinace podmínek a technických řešení. Například u skupiny OPT4 - Emisivity povrchů (viz Tab. 11.1-7) jsou vynechány modelové případy pro okolní podmínky $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, neboť za těchto podmínek je vliv emisivity materiálů vnitřních stěn na tepelnou pohodu cestujících zanedbatelný. Naopak jsou ponechány extrémní případy okolních teplot $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$, kdy může být vliv emisivity materiálů na tepelnou pohodu cestujících v kabině významnější a to především díky vyššímu rozdílu teplot povrchů. V některých případech byly také testovány specifické modifikace konstrukcí kabiny, které měly za cíl odstranění nedostatků některých jinak perspektivních technických řešení. Takovým případem jsou modelové případy C07 a C08 - Velkoplošná distribuce - Maximální Izolace ve skupině OPT3 - Tloušťka tep. izolace. U těchto případů byla zesílena tepelná izolace podlahy, neboť základní simulace C01 až C04 odhalily, že tepelnou nepohodu osob v kabině bude z největší části způsobovat nízká teplota v blízkosti podlahy, která je primárně důsledkem nižšího přívodu větracího vzduchu k podlaze při vytápění kabiny formou velkoplošné distribuce vzduchu.

K výše popsanému postupu je však nutné přistupovat velice obezřetně, neboť výběr perspektivních řešení a kombinací parametrů je většinou podložen pouze "inženýrským úsudkem" a záleží tedy velice na zkušenostech a vědomostech konkrétního experimentátora. Vlivem jeho úsudku mohou být vyloučena některá netradiční řešení pouze z důvodu prvotní "nesmyslnosti" či "neotřelosti" technického řešení či přístupu. Vznik matice modelových případů je navíc iterativní proces, což znamená, že konečný rozsah a počet případů nelze naplánovat na "první pokus". Většinou je nezbytné provést nejprve testovací simulace z každé skupiny a na základě jejich výsledků poté upravit kombinace a zaměření jednotlivých skupin a podskupin. To je dobře patrné na složení modelových případů skupiny OPT2 - Geometrie distribučních vzduchovodů, kdy na základě poznatků a vyhodnocení výsledků simulací ze skupiny OPT1 - Typu distribuce vzduchu, byla většina případů ve skupině OPT2 zaměřena na zkoumání vlivu geometrie vzduchovodů u modifikovaného typu směšovacího větracího systému.

11.2 Geometrie interiéru a typické nastavení okrajových podmínek

Pro optimalizační simulace byla vytvořena nová geometrie vycházející z designu skutečných interiérových panelů a sedadel. Uspořádání geometrie typově vycházelo z vybavení kabiny pro přepravu osob ve verzi pro devět cestujících. Na základě navržených provozních parametrů, z nichž vycházely zvolené modelové situace, byly na pět sedaček umístěny figuríny. Základní náhled uspořádání geometrie modelu interiéru kabiny je uveden na Obr. 11.2-1



Geometrie interiérových panelů, podlahy a výplní otvorů

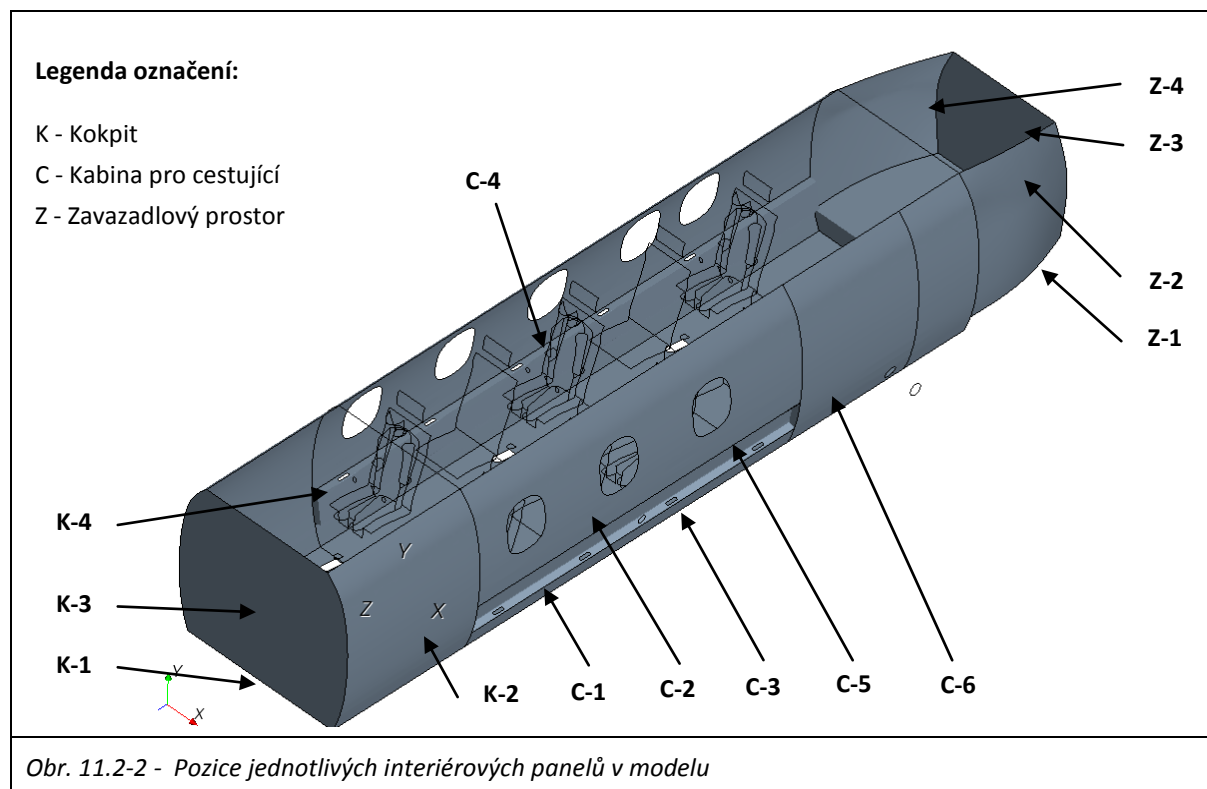
Vnitřní interiérové panely tvoří pohledovou část interiéru stěn a stropu kabiny. Zároveň jsou také hlavní hranicí, která definuje geometrie výpočetní domény modelu kabiny. Prostor kabiny se skládá ze tří sekcí přední - Kokpit, střední - Kabina pro cestující a zadní - Zavazadlový prostor a tomuto dělení odpovídalo i rozdělení geometrie interiérových panelů v modelu (viz Obr. 11.2-2).

Přední část - Kokpit: Příčný profil stěnových a stropních panelů je ve směru podélné osy konstantní a nejsou v něm žádné otvory. Panely jsou rozděleny do částí - Podlaha (pozice K-1), Stěny (pozice K-2), Přední přepážka (pozice K-3) a Strop (pozice K-4), (viz Obr. 11.2-2)

Střední část - Kabina pro cestující: Příčný profil stěnových a stropních panelů je ve směru podélné osy konstantní. Ve stěnových panelech je osm otvorů pro okénka, jejichž rozmístění a tvar odpovídá okénkům na maketě kabiny. Geometrie části panelů, tvořících kryt

distribučních vzduchovodů je vždy přizpůsobena geometrii vzduchovodů a počet a geometrie otvorů odpovídá počtu a geometrii distribučních výustek. Panely jsou rozděleny do částí - Podlaha (pozice C-1), Stěny-Horní (pozice C-2), Stěny-pod-vzduchovody (pozice C-3), Strop (pozice C-4), Kryt vzduchovodů (pozice C-5) a Dveře (pozice C-6) (viz Obr. 11.2-2).

Zadní část - Zavazadlový prostor: Část Zavazadlový prostor je z velké části situována do ocasní části trupu, a proto se v příčném profilu zužuje a zmenšuje se i její světlá výška. Panely jsou rozděleny do částí - Podlaha (pozice Z-1), Stěny (pozice Z-2), Zadní přepážka (pozice Z-3) a Strop (pozice Z-4) (viz Obr. 11.2.2).



Okrajové podmínky: Všechny interiérové panely byly nastaveny jako typ okrajové podmínky Stěna se součinitelem prostupu tepla a emisivitou povrchu odpovídající navržené materiálové skladbě - viz tabulka 11.2-1. Pokud se hodnoty parametrů panelů nějak lišily od základní varianty pak jsou příslušné změny uvedeny v tabulkách podkapitol 11.3., 11.4, 11.5 a 11.6.

Vlastnosti oken byly pro všechny modelové případy shodné - součinitel prostupu tepla $3,77 \text{ W/m}^2\text{K}$ (v hodnotě je započten součinitel přestupu tepla konvekcí na vnější straně $4 \text{ W/m}^2\text{K}$) a emisivita 0,85.

Tab. 11.2-1 - Parametry konstrukcí interiérových panelů

Poz.	Část	Plocha [m ²]	Materiál [-]	Tloušťka [mm]	λ [W/mK]	R_c [m ² K/W]	U_c [W/m ² K]
K-1	Kokpit podlaha (celkem)	1,807	-	68	-	1,094	0,744
	materiál konstrukce		Dřevotříska	16	0,170	0,094	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-
K-2	Kokpit stěny	3,892	-	52	-	1,025	0,784
	materiál konstrukce		Sololit	2	0,080	0,025	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-
K-3	Kokpit přepážka	2,221	-	16	-	0,094	2,906
	materiál konstrukce		Dřevotříska	16	0,170	0,094	-
	materiál tep. izolace		-	-	-	-	-
K-4	Kokpit strop	1,548	-	54	-	1,050	0,769
	materiál konstrukce		Sololit + karton	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-
C-1	Kabina podlaha	6,905	-	80	-	1,150	0,714
	materiál konstrukce		Překližka	30	0,200	0,150	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-
C-2	Kabina stěny horní	8,520	-	52	-	1,025	0,784
	materiál konstrukce		Sololit	2	0,080	0,025	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-
C-3	Kabina stěny pod vzduchov.	1,522	-	52	-	1,025	0,784
	materiál konstrukce		Sololit	2	0,080	0,025	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-
C-4	Kabina strop	5,829	-	54	-	1,050	0,769
	materiál konstrukce		Sololit + karton	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-
C-5	Kabina kryty vzduchovodů	dle typu vzd.	-	-	-	adiabat	adiabat
C-6	Kabina dveře	1,698	-	54	-	1,050	0,769
	materiál konstrukce		Sololit	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-
Z-1	Zavazadl. prost. podlaha	1,780	-	18	-	0,090	2,941
	materiál konstrukce		Překližka	18	0,200	0,090	-
	materiál tep. izolace		-	-	-	-	-
Z-2	Zavazadl. prost. stěny	2,533	-	52	-	1,025	0,784
	materiál konstrukce		Sololit	2	0,080	0,025	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-
Z-3	Zavazadl. prost. přepážka	1,255	-	18	-	0,090	2,941
	materiál konstrukce		Překližka	18	0,200	0,090	-
	materiál tep. izolace		-	-	-	-	-
Z-4	Zavazadl. prost. strop	1,207	-	54	-	1,050	0,769
	materiál konstrukce		Sololit + karton	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	50	0,050	1,000	-

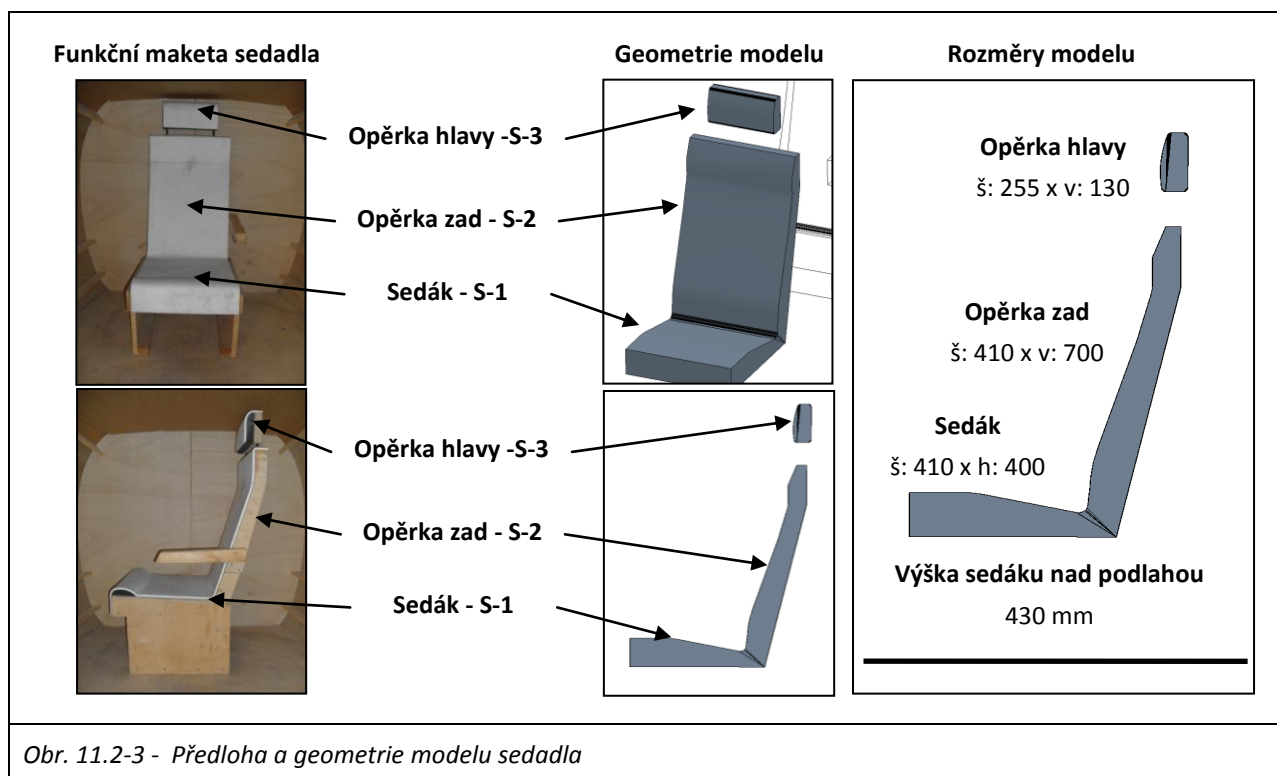
- V hodnotě U_c je u všech panelů započten součinitel přestupu tepla konvekcí na vnější straně 4 W/m²K.

- Emisivita povrchů všech panelů je rovna hodnotě 0,90. - Celkový objem kabiny: 14,99 m³

Geometrie vybavení interiéru

Maketa poskytnutá firmou Evector obsahovala i designérskou maketu jednoho sedadla, jejíž rozměry byly použity pro vytvoření geometrie sedadla použitého v modelu. Při vytváření geometrie makety sedadla byly přeneseny jen hlavní části konstrukce a příliš detailní části jako např. konstrukce upevňující sedadlo k podlaze a kovové držáky opěrky hlavy, byly vypuštěny. Tyto části jsou totiž u reálného sedadla realizovány pomocí subtilních trubkových konstrukcí, které nepředstavují výraznější překážku pro proudění vzduchu a v CFD modelu by naopak příliš zvyšovaly množství výpočetních buněk. Geometrie sedadla byla rozdělena do částí - Sedák (pozice S-1), Opěrka zad (pozice S-2) a Opěrka hlavy (pozice S-3) (viz Obr. 11.2-3). Rozměry Sedáku jsou šířka 410 mm x hloubka 400 mm, Opěrky zad šířka 410 mm x výška 700 mm a Opěrky hlavy šířka 255 mm x výška 130 mm.

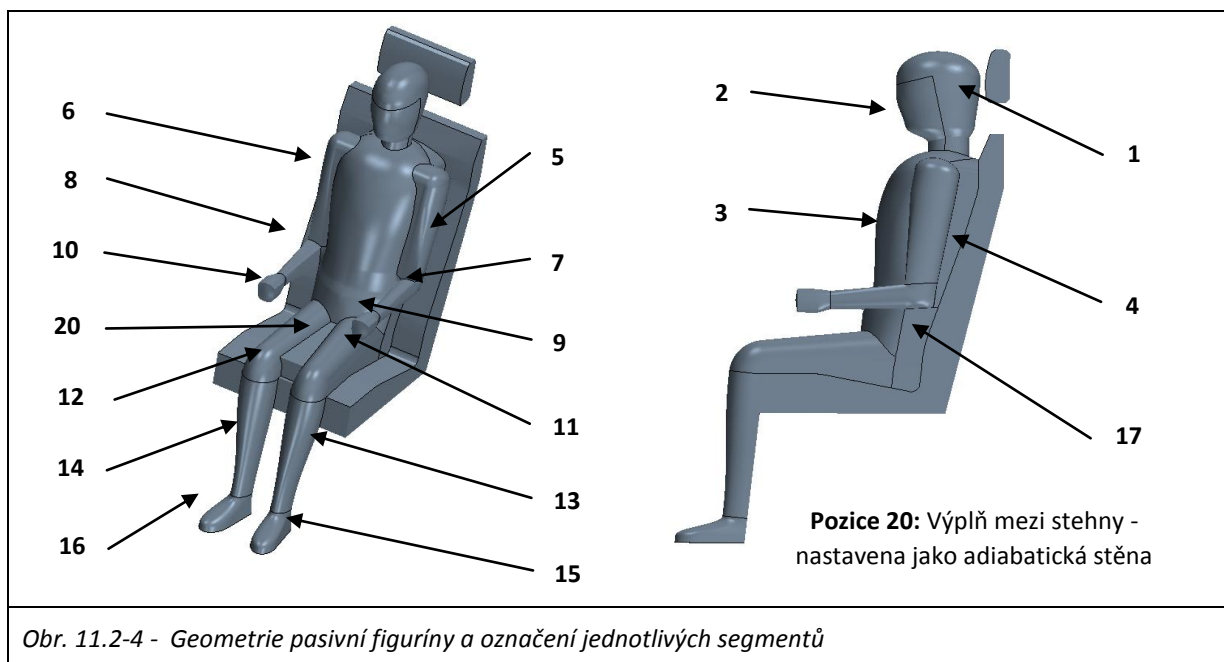
Okrajové podmínky: Všechny části sedala byly nastaveny jako typ okrajové podmínky adiabatická stěna s emisivitou 0,85. Části Sedák a Opěrka zad, byly ještě dále rozděleny na plochy, které jsou ve styku s tělem člověka a zbytek, který tvoří konstrukci sedadla. Toto rozdělení bylo vytvořeno především s ohledem na možnost budoucího rozšíření simulací například o individuální vyhřívání sedacích ploch. Ačkoliv toto nastavení nebylo v rámci práce využito, je nezbytné podotknout, že při vytváření modelu je dobré pamatovat na jeho případnou rozšiřitelnost a geometrii všech částí tomuto účelu pokud možno přizpůsobit. Jakékoliv úpravy v geometrii hotového modelu jsou posléze velice obtížně realizovatelné a tím i velice pracné a časově náročné.



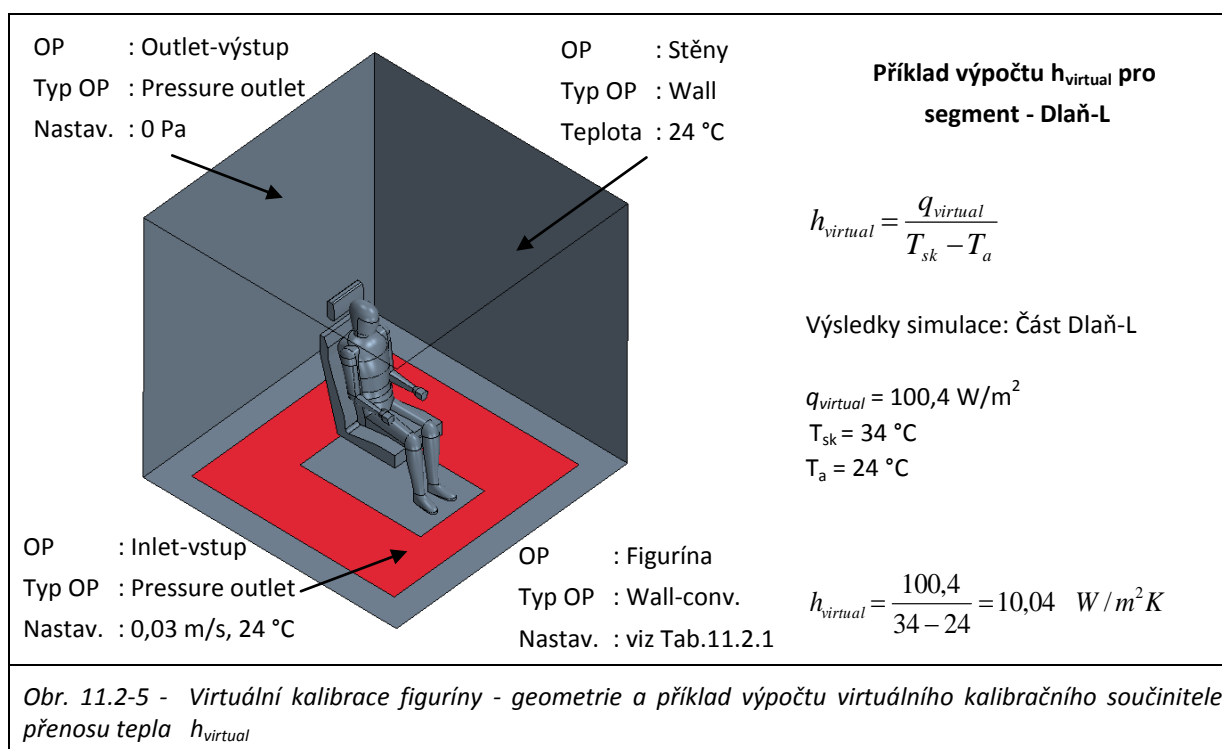
Obr. 11.2-3 - Předloha a geometrie modelu sedadla

Geometrie figurín

Geometrie člověka sedícího na sedadle, byla v modelu reprezentována figurínou se zjednodušenou geometrií. Jedná se o figurínu běžně využívanou firmou Airbus při simulacích prostředí v kabině letadel a na pracoviště autora byla poskytnuta v rámci projektu iSPACE. Geometrie reprezentuje tzv. "člověka průměrného vzrůstu" výšky cca 175 cm a váhy cca 75 kg. Poloha končetin vůči trupu je uzpůsobena použití při simulaci sedavých činností, které jsou dominantní pro pobyt v kabině letadla. Přizpůsobení pro CFD simulace je dále patrné ze zjednodušení geometrie dlaní a také z uzavření částí mezi horními končetinami a trupem a vyplněním prostoru mezi stehny. Tyto úpravy zjednodušují geometrii figuríny a odstraňují regiony, které jsou svojí uzavřeností a značnou blízkostí povrchů problematické z pohledu korektní simulace přenosu tepla konvekcí a radiací. Vzhledem k tomu, že je figurína usazena na sedadlo, není v geometrii zahrnuta část reprezentující hýždě. Geometrie figuríny je rozdělena do celkem sedmnácti částí (viz Obr. 11.2-4), jejichž označení a nastavení je uvedeno v tabulce 11.2-2.



Virtuální kalibrace figuríny: Aby bylo možné využít figurínu pro výpočet ekvivalentních segmentových teplot a predikci tepelného komfortu pro jednotlivé části těla, je potřeba nejprve provést tzv. virtuální kalibraci (NILSSON, 2004). Ta spočívá ve vytvoření speciální simulace, kdy je figurína se sedadlem umístěna do kalibračního boxu o rozměrech 2 x 2 x 2 m (viz Obr. 11.2-5). Prakticky celá podlaha boxu, mimo část bezprostředně pod figurínou a v blízkosti stěn boxu, je nastavena jako okrajová podmínka typu Inlet-vstup s předepsanou nízkou vstupní rychlostí 0,03 m/s. Celá plocha stropu je pak nastavena jako Outlet-výstup, a slouží jako výstup z domény. Velká plocha vstupu a výstupu zaručuje dobrý odvod tepla generovaného figurínou a zajišťuje tak zachování požadovaných homogenních kalibračních podmínek. Teplota přiváděného vzduchu i všech okolních stěn je nastavena na 24 °C. Okrajové podmínky na figuríně jsou nastaveny dle tabulky 11.2-2.



Tab. 11.2-2 - Pojmenování a nastavení okrajových podmínek na jednotlivých částech figuríny

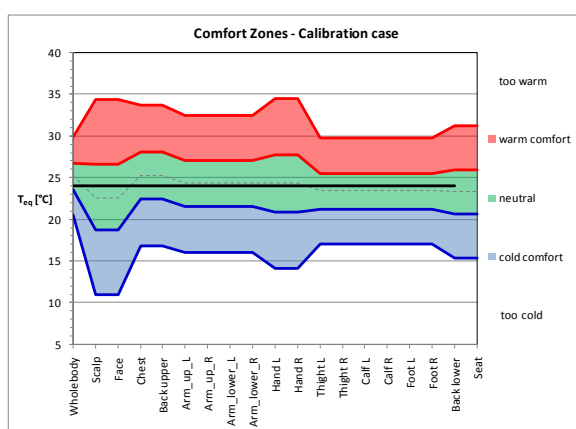
Poz.	Část	Plocha [m ²]	R _{cl} - letní oděv [m ² K/W]	R _{cl} - zimní oděv [m ² K/W]	T _{sk} [°C]	Nast. OP [-]	ε [-]
1	Hlava s vlasy (Scalp)	0,081	0,178	0,160	34	konvekce	0,95
2	Obličej (Face)	0,040	0,000	0,000	34	stěna	0,98
3	Hrudník (Chest)	0,160	0,130	0,380	34	konvekce	0,95
4	Záda-horní (Back-upper)	0,033	0,077	0,205	34	konvekce	0,95
5	Nadloktí L (Arm upper L)	0,061	0,142	0,353	34	konvekce	0,95
6	Nadloktí P (Arm upper R)	0,061	0,127	0,333	34	konvekce	0,95
7	Předloktí L (Arm lower L)	0,037	0,096	0,207	34	konvekce	0,95
8	Předloktí P (Arm lower R)	0,037	0,094	0,206	34	konvekce	0,95
9	Dlaň L (Hand L)	0,016	0,000	0,032	34	stěna	0,98
10	Dlaň P (Hand R)	0,016	0,000	0,042	34	stěna	0,98
11	Stehno L (Thigh L)	0,067	0,088	0,101	34	konvekce	0,95
12	Stehno P (Thigh R)	0,067	0,093	0,100	34	konvekce	0,95
13	Lýtko L (Calf L)	0,079	0,089	0,094	34	konvekce	0,95
14	Lýtko P (Calf R)	0,079	0,089	0,093	34	konvekce	0,95
15	Chodidlo L (Foot L)	0,026	0,170	0,135	34	konvekce	0,95
16	Chodidlo P (Foot R)	0,026	0,154	0,133	34	konvekce	0,95
17	Záda-bedra (Back-lower)	0,027	0,185	0,310	34	konvekce	0,95
18	Hýždě (Seat)	nedef.	0,107	0,088	34	konvekce	0,95
19	Celé tělo (Whole body)	0,914	nedef.	nedef.	34	nedef.	-

Parametry sítě výpočtových buněk a nastavení řešiče musí být stejné jako v ostatních simulacích, kde bude figurína využívána. Především je potřeba dbát na správné ošetření a nastavení přistěnných oblastí na okrajových podmínkách figuríny, neboť je zcela nezbytné co nejpřesněji určit tepelné toky z jednotlivých částí. V blízkosti povrchu figuríny bylo vygenerováno devět vrstev prizmatických buněk s celkovou výškou 1 cm a

"layer stretching" faktorem 1,5. Tím bylo dosaženo požadované hodnoty parametru $y^+ \approx 1$ pro ošetření přístěnné oblasti metodou low Reynolds number. Ze získaných tepelných toků, které zahrnují přenos tepla radiací a konvekcí pak byly vypočteny virtuální kalibrační součinitele přenosu tepla $h_{virtual}$ - vzorový výpočet viz Obr. 11.2-5, hodnoty získané z kalibrační simulace viz Tab. 11.2-3 a Obr. 11.2-6. Měrný tepelný tok pro část Celé tělo je vypočten jako vážený průměr jednotlivých částí, přičemž jako váhy jsou použity plochy jednotlivých částí figuríny z tabulky 11.2-2. Protože je figurína umístěna na sedadle a prakticky celá záda, hýždě a zadní strana stehen nejsou v geometrii zahrnuty je celková plocha figuríny pouze 0,914 m².

Tab. 11.2-3 - Kalibrační součinitele přenosu tepla pro jednotlivé části figuríny

Poz.	Část	Měrný tep. tok [W/m ²]	$h_{virtual}$ [W/m ² K]
1	Hlava s vlasy (Scalp)	28,16	2,82
2	Obličej (Face)	98,38	9,84
3	Hrudník (Chest)	34,96	3,50
4	Záda-horní (Back-upper)	39,84	3,98
5	Nadloktí L (Arm upper L)	35,23	3,52
6	Nadloktí P (Arm upper R)	35,19	3,52
7	Předloktí L (Arm lower L)	43,83	4,38
8	Předloktí P (Arm lower R)	43,65	4,37
9	Dlaň L (Hand L)	100,40	10,04
10	Dlaň P (Hand R)	100,94	10,09
11	Stehno L (Thigh L)	45,18	4,52
12	Stehno P (Thigh R)	45,35	4,54
13	Lýtko L (Calf L)	46,40	4,64
14	Lýtko P (Calf R)	46,33	4,63
15	Chodidlo L (Foot L)	36,61	3,66
16	Chodidlo P (Foot R)	36,63	3,66
17	Záda-bedra (Back-lower)	30,22	3,02
18	Hýždě (Seat)	nedefinováno	nedef.
19	Celé tělo (Whole body)	43,75	4,38



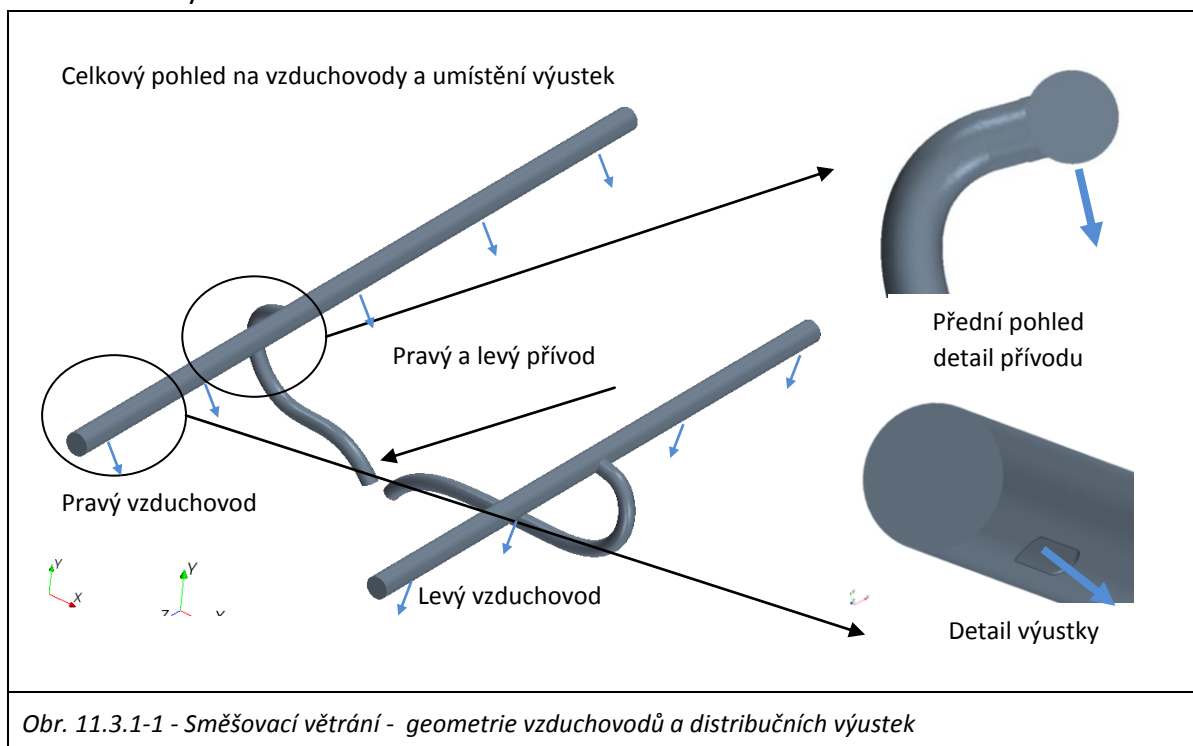
Obr. 11.2-6 - Ukázka diagramu komfortních zón pro kalibrační simulaci. Ekvivalentní teploty pro všechny části figuríny jsou díky homogenní podmínkám rovny 24 °C a spadají tak do neutrální oblasti.

11.3 Optimalizace typu distribuce vzduchu

V kapitola je vyšetřen vlivu typu distribuce větracího vzduchu na mikroklima a tepelnou pohodu v kabině. Autorem byly zvoleny pro optimalizaci tři technická řešení a to sice Směšovací větrání - viz kapitola 11.3.1, Modifikované směšovací větrání - viz kapitola 11.3.2 a Semizaplavovací větrání(distribuce vzduchu velkoplošnou výustkou) - viz kapitola 11.3.3.

11.3.1 Směšovací větrání

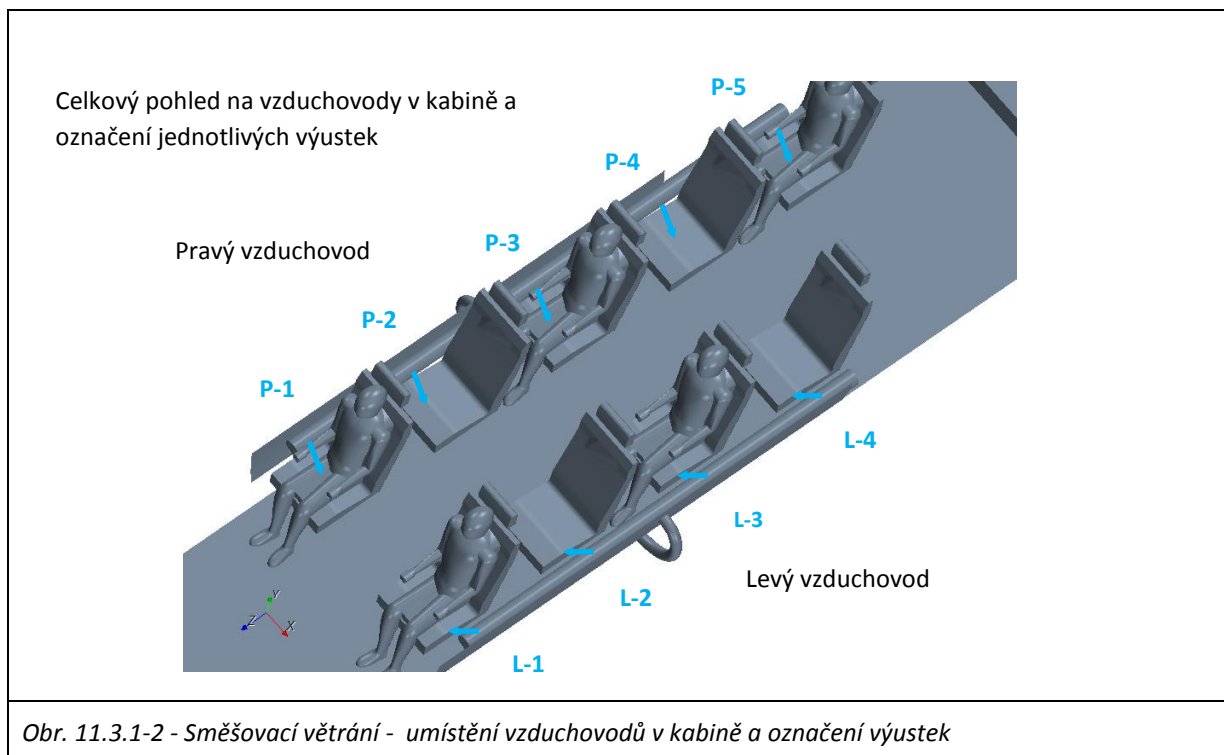
Hlavní princip: směšovacího větrání je založen na distribuci vzduchu do větraného prostoru z plošně relativně malých distribučních výustek s vysokou výstupní rychlostí vzduchu. V důsledku vyšší hybnosti vzduchu se uplatňují při jeho pohybu větraným prostorem především setrvačné síly a primární proudy z distribučních výustek tak mají relativně dlouhý dosah. Přiváděný vzduch se v důsledku přisávání okolního vzduchu intenzivně směšuje se vzduchem ve větraném prostoru a dochází tak k jeho obnově a výměně. Hlavním rizikem při tomto způsobu distribuce je nebezpečí vzniku průvanu a také hluku generovaného v distribučních vzduchovodech a výustkách. Na druhou stranu však intenzivní směšování/promíchávání obsahu kabiny zajišťuje možnost účinného a pružného vytápění či chlazení kabiny letadla.



Obr. 11.3.1-1 - Směšovací větrání - geometrie vzduchovodů a distribučních výustek

Realizace v modelu kabiny: Geometrie přívodních hadic, vzduchovodů a výustek, byla vytvořena na základě skutečných vzduchovodů realizovaných v maketě kabiny malého dopravního letadla. Vzduchovody jsou kruhového průřezu s vnitřním průměrem 100 mm. Na pravý vzduchovod je napojeno celkem pět distribučních výustek označených P1 až P5 na levý vzduchovod jsou pak napojeny čtyři výustky označené L1 až L4. Výustky mají tvar oválu s délkou 100 mm a šířkou 25 mm. Ve výustkách nejsou použity žádné vestavby ani krycí mřížky. Podélná rozteč mezi výustkami je 850 mm. Detailní popis vzduchovodu je uveden v

kapitole **10.1 Tvorba modelu makety**. Základní charakteristiky geometrie jsou uvedeny na Obr. 11.3.1-1 a pohled na umístění a označení jednotlivých výustek je uveden na Obr. 11.3.1-2



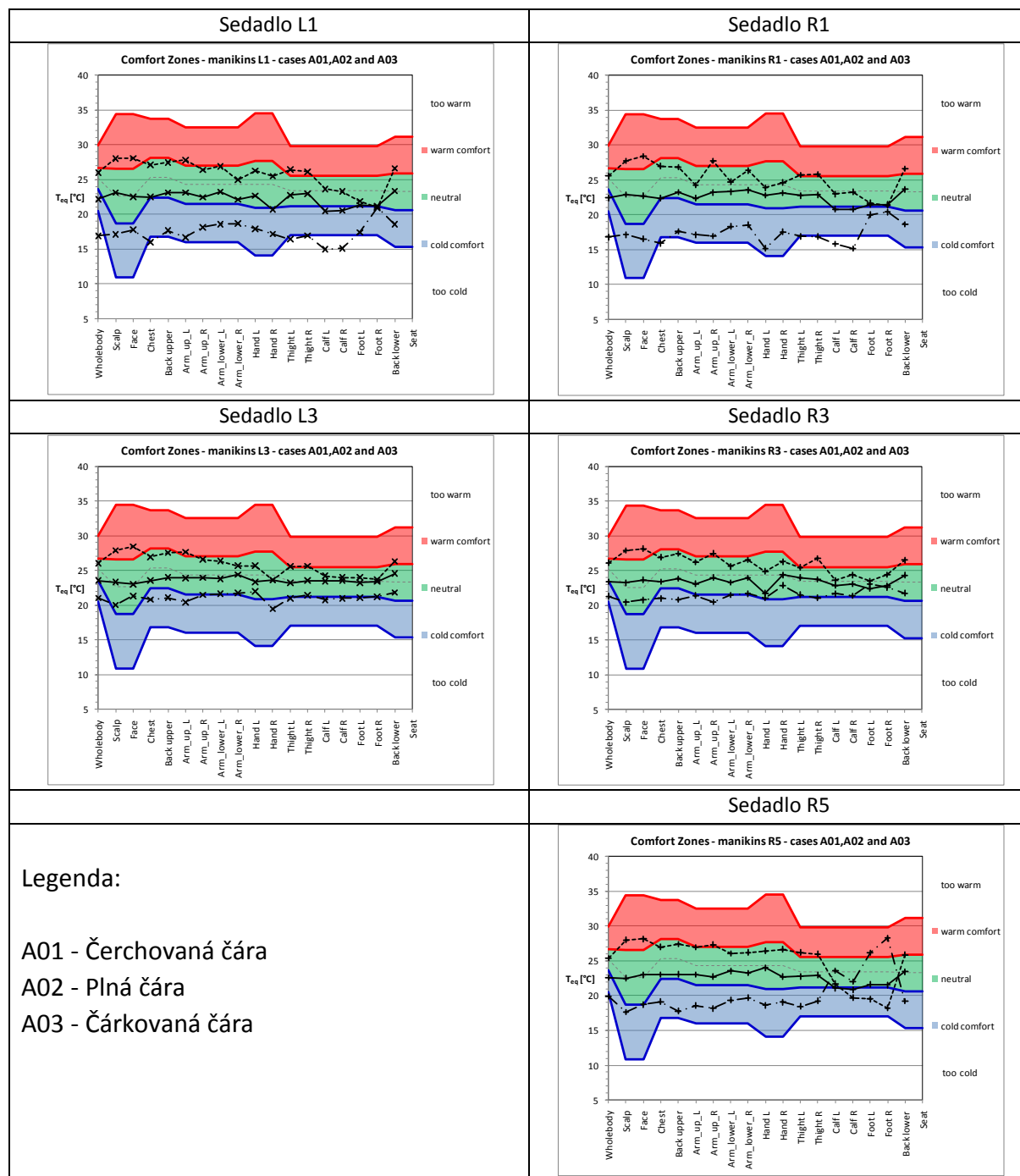
Nastavení okrajových podmínek: Nastavení okrajových podmínek vychází z konkrétních modelových případů pro Optimalizační skupinu OPT 1 - A - Mix-Normal.

Tab. 11.3.1-1 - Podskupina skupiny OPT 1 A -Mix-Normal - Nastavení okrajových podmínek

Podskupina	Případ	Teplota okolí [°C]	Teplota větracího vzduchu [°C]	Rychlost vstup pravý/levý [m/s]	Objem. tok [l/s]	Hmot. tok [kg/s]
A-Mix-Normal	A01	- 25 °C	47,4	10,41/8,18	66,5	0,0708
	A02	+15 °C	26,0	10,41/8,18	66,5	0,0759
	A03	+35 °C	16,4	10,41/8,18	66,5	0,0784

Vyhodnocení výsledků: Základní porovnání tepelného komfortu pro jednotlivé modelové případy je uvedeno v grafech uspořádaných do tabulky 11.3.1-2. Průběhy tepelných pocitů pro jednotlivá sedadla a všechny porovnávané modelové případy jsou vždy vyneseny do shodného grafu. V tabulce 11.3.1-3 jsou uvedeny tepelné pocity pro celé tělo (sloupec CTZ), počet částí těla v neutrální zóně (sloupec ČNZ) a poslední sloupec (označení Ko) uvádí, zda bylo dosaženo celkového tepelného komfortu v souladu s definicí dle Nilssona (NILSSON, 2004).

Tab. 11.3.1-2 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro případy A01, A02, A03



Tab. 11.3.1-3 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Figurína	L1			R1			L3			R3			R5		
	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
A01	-2	0	N	-2	0	N	-1	7	N	-1	11	N	-2	2	N
A02	-1	14	N	-1	15	N	-1	17	N	-1	17	N	-1	15	N
A03	0	11	N	0	11	N	0	11	N	0	12	N	0	7	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

Vyhodnocení výsledků podskupiny OPT1 A-Směšovací větrání

Z porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů OPT1-A01, A02 a OPT1-A03 a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu, které jsou vyčísleny v tabulce 11.3.1-3 je patrné, že vliv okolních podmínek na tepelnou pohodu při tomto typu distribuce je relativně výrazný. Celková tepelná pohoda se liší jak pro jednotlivé modelové případy, tak podle umístění sedadla v kabině. Například figuríny na předních sedadlech L1 a R1 jsou značně ovlivněny přední přepážkou v kokpitu, která není zateplena a v modelovém případě A01 je většina částí figurín v zóně -1 nebo -2. V třetí řadě na sedadlech L3 a R3 je tepelný pocit na většině částí figurín vyšší a osciluje mezi 0 až -1, neboť figuríny jsou v zákrytu za předními sedadly a střední část kabiny má také vyšší teplotu vzduchu díky intenzivnější výměně vzduchu (viz Příloha III - případ A01).

U případu A02 s okolní teplotou 15 °C se většina částí nachází v neutrální zóně, nebo jen těsně pod rozhraním zón 0 a -1. Z definice diagramu komfortních zón však ani na jednom sedadle není dosaženo celkové tepelné pohody.

Posledním modelovým příkladem skupiny OPT 1 je případ A03 s okolní teplotou +35 °C. Za těchto podmínek se většina částí těla nachází v neutrální oblasti, ovšem horní části těla jako obličej a hlava se nacházejí v zóně +1. U stropu dochází vlivem teplotní stratifikace k horší výměně vzduchu a tím k nižšímu odvodu tepla, což v důsledku znamená vyšší ekvivalentní teplotu na hlavě a obličeji.

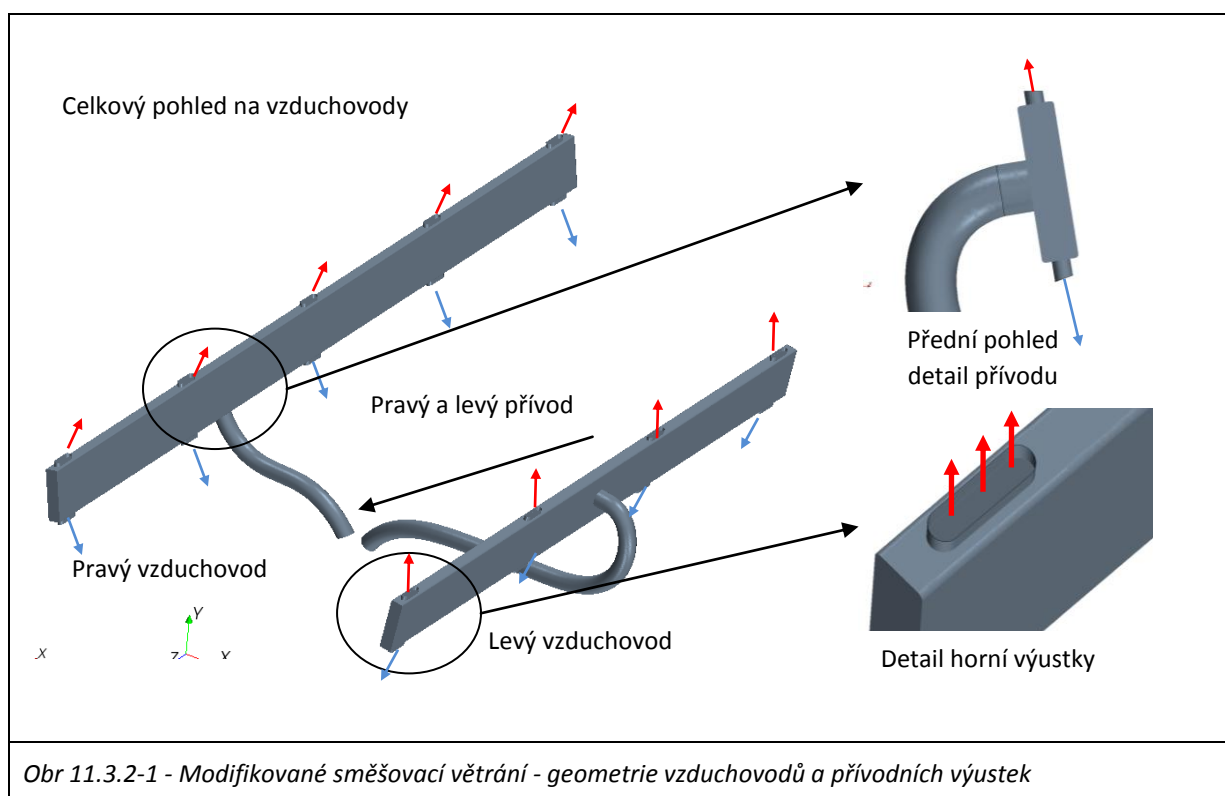
Za bližší povšimnutí stojí také diagram komfortních zón pro sedadlo R5, kde lze pozorovat značné ovlivnění tepelného pocitu na dolních končetinách v důsledku přímého vlivu primárního proudu z výustky P-5 (viz Příloha III - případ A01 a A03). V případě vytápění (případ A01), teplý vzduch z výustky způsobuje posun tepelného pocitu do zóny +1 zatímco při chlazení (případ A03) chladný vzduch způsobuje opačný efekt a tepelný pocit klesá do zóny -1. Výsledek tak dobře dokumentuje opodstatnění doporučení pro prevenci vzniku průvanu při větrání malých prostor, které uvádí, že primární proudy vzduchu by neměly být směřovány k částem těla citlivých na průvan jako jsou hlava, krk, ruce a chodidla.

Shrnutí výsledků: Z výsledků kapitoly 11.3.1 vyplývá, že Směšovací větrání poskytuje relativně dobrý výkon při všech třech zkoumaných okolních podmínkách. Zásadní problém s nízkým hodnocením tepelné pohody je však v první řadě, kde dochází k nadměrnému odvodu tepla radiací mezi figurínami a přední přepážkou v případě A01 - okolní teplota - 25 °C. V diagramu komfortních zón pro sedadlo R5, lze také dobře pozorovat ovlivnění tepelného pocitu na dolních končetinách v důsledku přímého vlivu primárního proudu z výustky P-5. Výsledek tak podporuje doporučení pro prevenci vzniku průvanu při větrání malých prostor, které uvádí, že primární proudy vzduchu by neměly být směřovány k částem těla citlivých na průvan jako jsou hlava, krk, ruce a chodidla. Vyhodnocení kvality větrání pomocí indexu průměrného stáří vzduchu je uvedeno pro všechny tři typy distribuce na konci kapitoly 11.3.

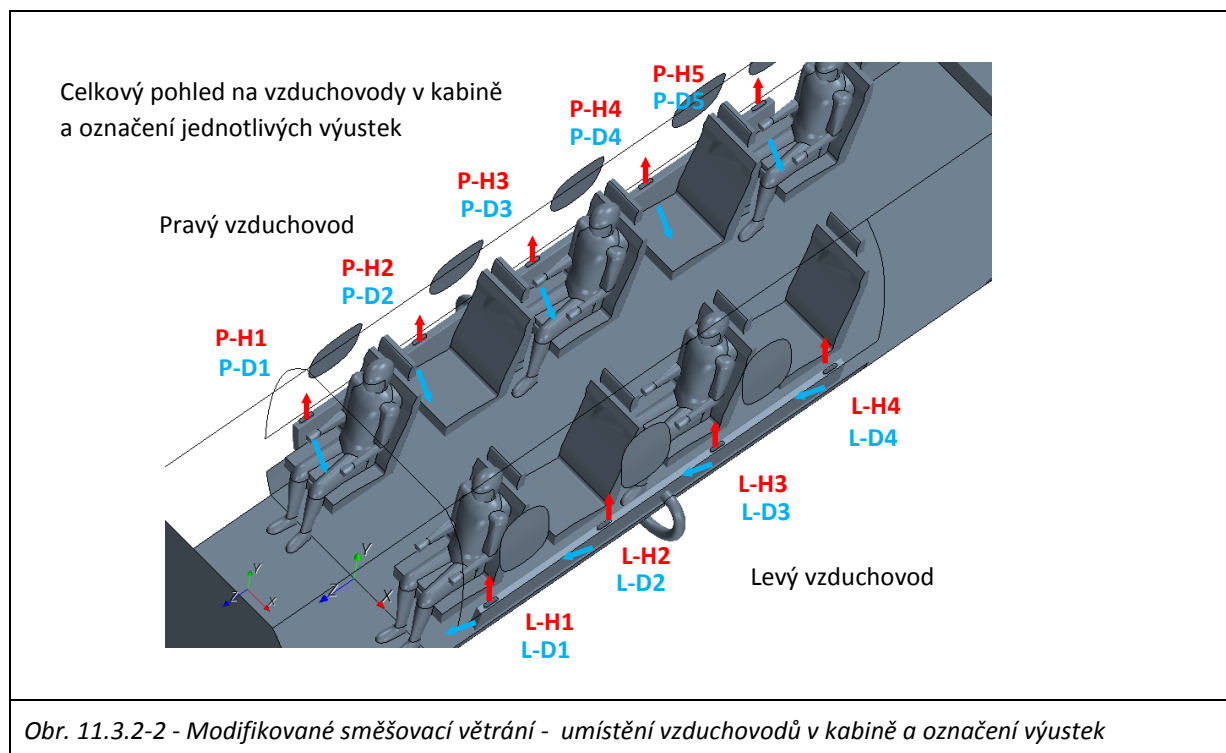
11.3.2 Modifikované směšovací větrání

Hlavní princip: Shodný s principem směšovacího větrání - viz kapitola 11.3.1

Realizace v modelu kabiny: Využívá vzduchovody obdélníkového průřezu (215 x 50 mm se zaoblením v rozích R5) s výstky přivádějícími větrací vzduch jak směrem dolů k podlaze, tak směrem nahoru ke stěnám kabiny (viz Obr 11.3.2-1 horní výstky jsou navrženy tak, aby směřovali primární proud ke stěnám kabiny). Hlavní ideou tohoto uspořádání bylo využít přilnutí proudu ke stěně v důsledku Coandova jevu a zajistit tak distribuci vzduchu do horní části kabiny, bez ohledu na to zda je realizován režim vytápění či chlazení kabiny. Přidanou hodnotou modifikace pak byl předpoklad, že přilnutí proudu ke stěně zabrání obtěžování cestujících průvanem.



Na pravý vzduchovod je napojeno celkem deset distribučních výustek rozdělených do dolní skupiny s označením P-D1 až P-D5 a horní skupiny s označením P-H1 až P-H5. Na levý vzduchovod je pak napojeno osm výustek rozdělených do dolní skupiny s označením L-D1 až L-D4 a horní skupiny s označením L-H1 až L-H4. Výstky mají tvar oválu s délkou 100 mm a šířkou 25 mm. Ve výstkách nejsou použity žádné vestavby ani krycí mřížky. Podélná rozteč mezi výstky je 850 mm. Základní charakteristiky geometrie jsou uvedeny na Obr. 11.3.2-1 a pohled na umístění a označení jednotlivých výustek je uveden na Obr. 11.3.2-2.



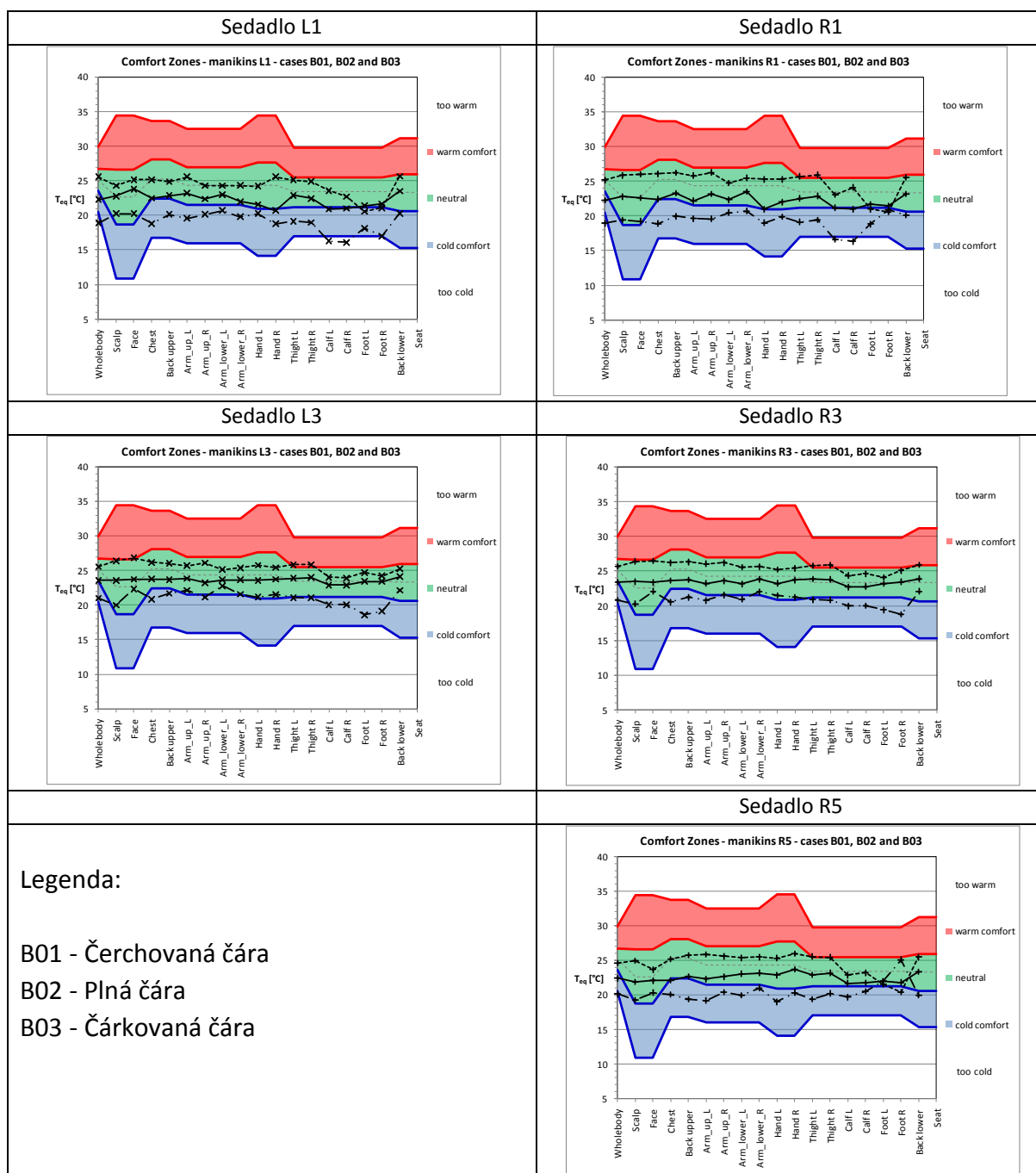
Nastavení okrajových podmínek: vychází z konkrétních modelových případů pro Optimalizační skupinu OPT 1 - B - Mix-Modif.

Tab. 11.3.2-1 - Podskupina skupiny OPT 1 B -Mix-Modif - Nastavení okrajových podmínek

Podskupina	Případ	Teplota okolí [°C]	Teplota větracího vzduchu [°C]	Rychlost vstup pravý/levý [m/s]	Objem. tok [l/s]	Hmot. tok [kg/s]
B-Mix-Modif	B01	-25 °C	47,4	10,41/8,18	66,5	0,0708
	B02	+15 °C	26,0	10,41/8,18	66,5	0,0759
	B03	+35 °C	16,4	10,41/8,18	66,5	0,0784

Vyhodnocení výsledků: Základní porovnání tepelného komfortu pro jednotlivé modelové případy je uvedeno v grafech uspořádaných do tabulky 11.3.2-2. Průběhy tepelných pocitů pro jednotlivá sedadla a všechny porovnávané modelové případy jsou vždy vyneseny do shodného grafu. V tabulce 11.3.2-3 jsou uvedeny tepelné pocity pro celé tělo (sloupec CTZ), počet částí těla v neutrální zóně (sloupec ČNZ) a poslední sloupec (označení Ko) uvádí zda, bylo dosaženo celkového tepelného komfortu v souladu s definicí dle Nilssona (NILSSON, 2004).

Tab. 11.3.2-2 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro případy B01, B02, B03



Tab. 11.3.2-3 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Figurína	L1			R1			L3			R3			R5		
	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
B01	-2	2	N	-2	2	N	-1	8	N	-1	6	N	-1	4	N
B02	-1	13	N	-1	14	N	0	17	A	0	17	A	-1	16	N
B03	0	15	N	0	13	N	0	15	N	0	16	N	0	16	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

Vyhodnocení výsledků podskupiny OPT1 - Modifikované směšovací větrání

Z porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů OPT1-B01, B02 a OPT1-B03 a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu, které jsou vyčísleny v tabulce 11.3.2-3 je patrné, že vliv okolních podmínek na tepelnou pohodu při tomto typu distribuce je nižší než při klasickém směšovacím větrání (viz kapitola 11.3.1). Stále lze sice pozorovat změny tepelné pohody jak pro jednotlivé modelové případy, tak podle umístění sedadla v kabině, ale variabilita tepelných pocitů je nižší. Například figuríny na předních sedadlech L1 a R1 jsou ovlivněny přední přepážkou v případě B01 méně, než tomu bylo u modelového případu A01.

U případu B02 s okolní teplotou + 15 °C se většina částí nachází v neutrální zóně, nebo jen těsně pod rozhraním zón 0 a -1 a na sedadlech L3 a LR je dosaženo celkové tepelné pohody dle definice diagramu komfortních.

Při okolní teplotě +35 °C (modelový případ OPT1-B03) se většina částí těla na většině figurín nachází v neutrální oblasti nebo jen blízko od přechodu ze zóny 0 do zóny +1 nebo -1. I na sedadle R5 je pouze pravé chodidlo v případě chlazení jen těsně v oblasti -1 což je významné vylepšení oproti situaci u modelového případu A03.

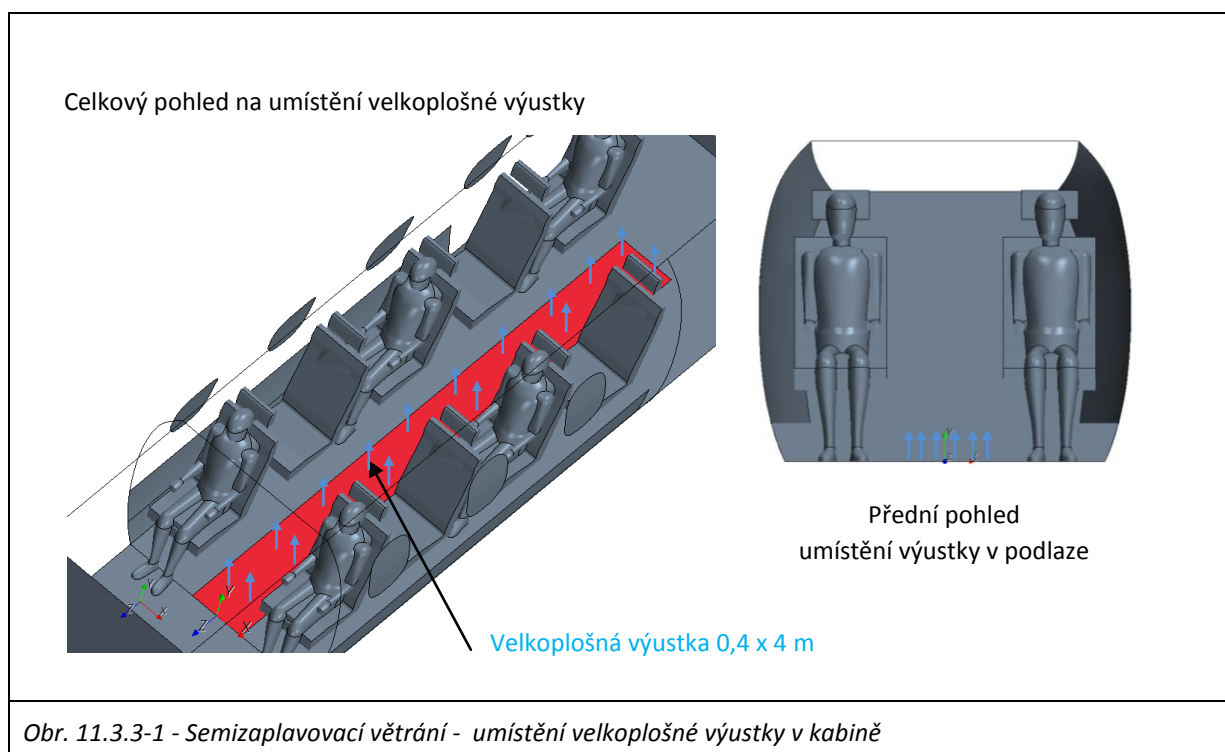
Hodnoty v Diagramu komfortních zón pro sedadlo R5 také dokumentují podstatně nižší ovlivnění tepelného pocitu na dolních končetinách v důsledku přímého vlivu primárního proudu z výustky PD-5 (viz Příloha III - případ B01 a B03). Vylepšení je dosaženo v důsledku nižší výstupní rychlosti z distribučních výustek, neboť jich je k dispozici dvojnásobné množství oproti směšovacímu větrání.

Shrnutí výsledků: Z výsledků kapitoly 11.3.2 vyplývá, že Směšovací větrání poskytuje dobrý výkon při všech třech zkoumaných okolních podmínkách. Zásadní problém s nízkým hodnocením tepelné pohody v první řadě, kde u směšovacího větrání docházelo k nadměrnému odvodu tepla radiací, je u modifikovaného směšovacího větrání snížen. Hodnoty v Diagramu komfortních zón pro sedadlo R5 také dokumentují podstatně nižší ovlivnění tepelného pocitu na dolních končetinách v důsledku přímého vlivu primárního proudu z výustky PD-5 (viz Příloha III - případ B01 a B03). Vylepšení je dosaženo v důsledku nižší výstupní rychlosti z distribučních výustek, neboť jich je k dispozici dvojnásobné množství oproti směšovacímu větrání. Vyhodnocení kvality větrání pomocí indexu průměrného stáří vzduchu je uvedeno pro všechny tři typy distribuce na konci kapitoly 11.3.

11.3.3 Semizaplavovací větrání (Distribuce velkoplošnou výustkou)

Hlavní princip: je založeno na principu distribuce vzduch do větraného prostoru s nízkou vstupní rychlostí, což většinou vyžaduje velkoplošné distribuční výustky. V důsledku nízké hybnosti přiváděného vzduchu se uplatňují při pohybu vzduchu větraným prostorem především vztahové síly, přičemž prakticky nelze pozorovat dominantní primární proudy z přiváděcích výustek. Na pohyb ve větraném prostoru pak mají především vliv zdroje tepla (např. technika, cestující) či chladu (např. stěny kabiny, okénka), které generují stoupavé/sestupné proudy. Z výše popsaného plynou hlavní výhody i nevýhody. Hlavním rizikem při tomto způsobu distribuce je nebezpečí nežádoucí výškové stratifikace vrstev vzduchu především v případech, kdy je potřeba intenzivnějšího vytápění či chlazení. Tato stratifikace pak může vést k nízkým teplotám u podlahy, nebo naopak k vysokým teplotám ve výšce hlavy. Stratifikace má pak negativní vliv i na větrání a výměnu vzduchu v prostoru kabiny. Výhodou přístupu je však fakt, že díky nízké výstupní rychlosti z distribučních výustek je prakticky eliminováno nebezpečí vzniku průvanu ve větraném prostoru.

Realizace v modelu kabiny: Vzhledem k prostorovým omezením ve stěnách a stropu kabiny malých dopravních letadel bylo jako jediné možné umístění velkoplošné výustky vytipován prostor podlahy uličky mezi sedadly. Takto navržená výustka má rozměry 0,4 x 4 m a zaujímá prakticky celou šířku uličky (viz Obr 11.3.3-1)



Nastavení okrajových podmínek: vychází z konkrétních modelových případů pro Optimalizační skupinu OPT 1 - C - Semizaplavovací.

Tab. 11.3.3-1 - Podskupina OPT 1 C - Semizaplavovací - Nastavení okrajových podmínek

Podskupina	Případ	Teplota okolí [°C]	Teplota větracího vzduchu [°C]	Rychlost vstup pravý/levý [m/s]	Objem. tok [l/s]	Hmot. tok [kg/s]
C-Velkoplošná	C01	- 25 °C	47,4	0,042	66,5	0,0708
	C02	+15 °C	26,0	0,042	66,5	0,0759
	C03	+35 °C	16,4	0,042	66,5	0,0784

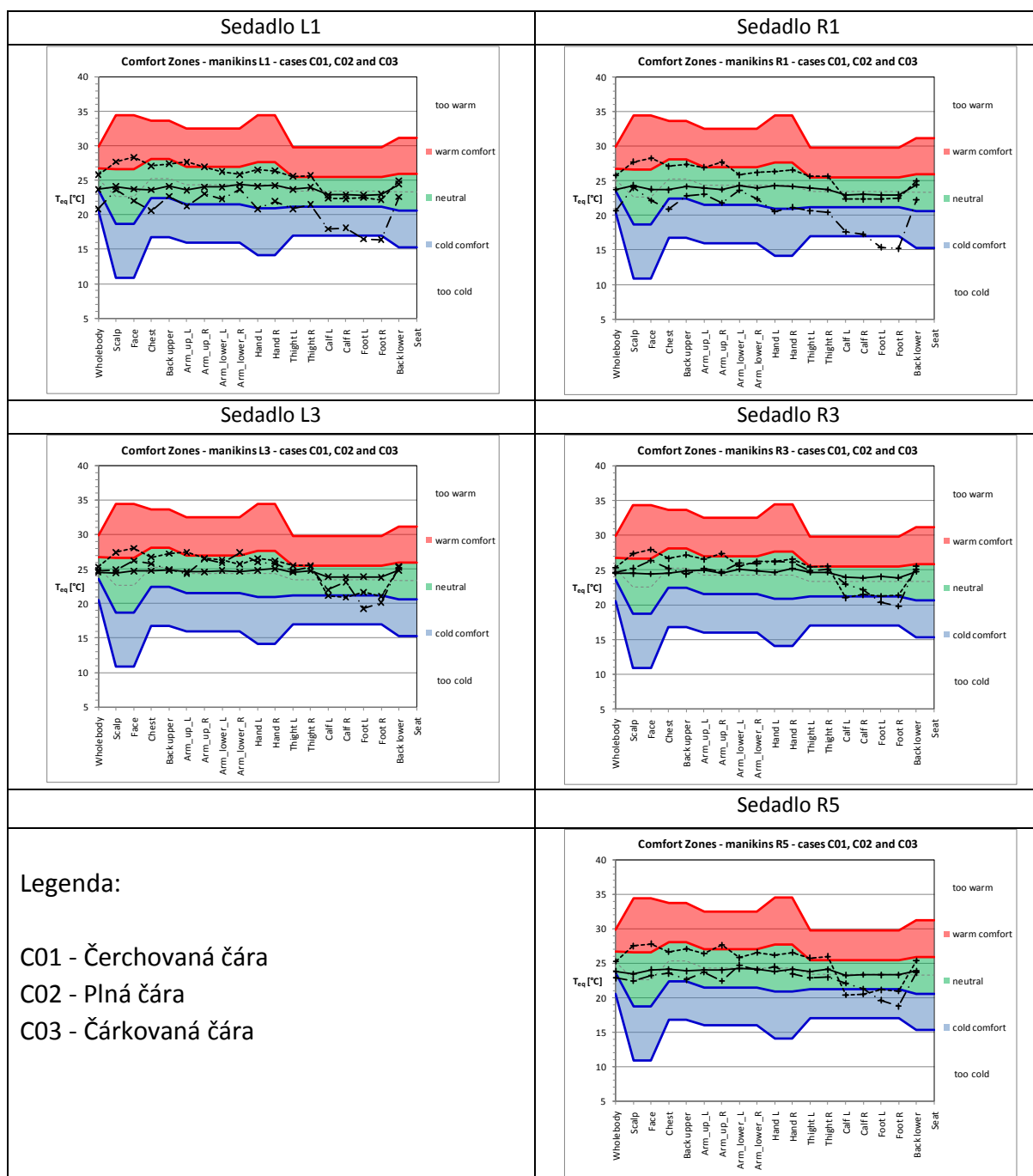
Základní porovnání tepelného komfortu pro jednotlivé modelové případy je uvedeno v grafech uspořádaných do tabulky 11.3.3-2. Průběh tepelných pocitů pro jednotlivá sedadla a všechny porovnávané modelové případy je vždy vyneseno do shodného grafu. V tabulce 11.3.3-3 jsou uvedeny tepelné pocity pro celé tělo (sloupec CTZ), počet částí těla v neutrální zóně (sloupec ČNZ) a poslední sloupec (označení Ko) uvádí zda bylo dosaženo celkového tepelného komfortu v souladu s definicí dle Nilssona (NILSSON, 2004).

Vyhodnocení výsledků podskupiny OPT1 C Semizaplavovací větrání

Z porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů OPT1-C01, C02 a OPT1-C03 a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu, které jsou vyčísleny v tabulce 11.3.3-3 bylo zjištěno, že vliv okolních podmínek na tepelnou pohodu při tomto typu distribuce je nutné posuzovat odděleně pro všechny tři zkoumané případy. Pro případ B02 s okolní teplotou +15 °C jsou na všech sedadlech všechny části v neutrální zóně a je tak dosaženo i celkové tepelné pohody. Pro případ C01 a C03 lze pozorovat jev, kdy horní části těla jsou většinou v neutrální zóně nebo v blízkosti přechodu mezi zónami okolními, ale části dolních končetin a zejména chodidla vykazují významně nižší ekvivalentní teplotu. Jedná se o fenomén, teplotní výškové stratifikace, který se projevil opakovaně i u ostatních modelových případů se Semizaplavovacím větráním. Z důvodu nízké výstupní rychlosti vzduchu přiváděného velkoplošnou výstmkou na podlaze, nízké hybnosti a vyššího rozdílu teplot mezi přiváděným vzduchem a vzduchem v kabině, dochází k akumulaci větracího vzduchu u podlahy (režim chlazení - případ C03) nebo u stropu (režim vytápění - případ C01). To posléze způsobuje nedostatečné vytápění prostoru u podlahy (režim vytápění C01) nebo nedostatečné větrání prostoru u hlavy a nízkou teplotu u nohou (režim chlazení C03). Proto byla navržena i speciální skladba tepelné izolace ve skupině OPT 3, která se vyznačovala zvýšenou silou izolace pod podlahou za účelem potlačit tuto nepříznivou vlastnost Semizaplavovacího větrání (viz kapitola 11.5).

Shrnutí výsledků: Z výsledků kapitoly 11.3.3 vyplývá, že Semizaplavovací větrání vykazuje ze všech tří posuzovaných typů distribuce nejlepší tepelnou pohodu při okolní teplotě +15 °C ovšem vzhledem k základnímu principu je jeho výkon velice citlivý na okolní a provozní podmínky. Vyhodnocení kvality větrání pomocí indexu průměrného stáří vzduchu je uvedeno pro všechny tři typy distribuce na konci kapitoly 11.3.

Tab. 11.3.3-2 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro případy C01, C02, C03



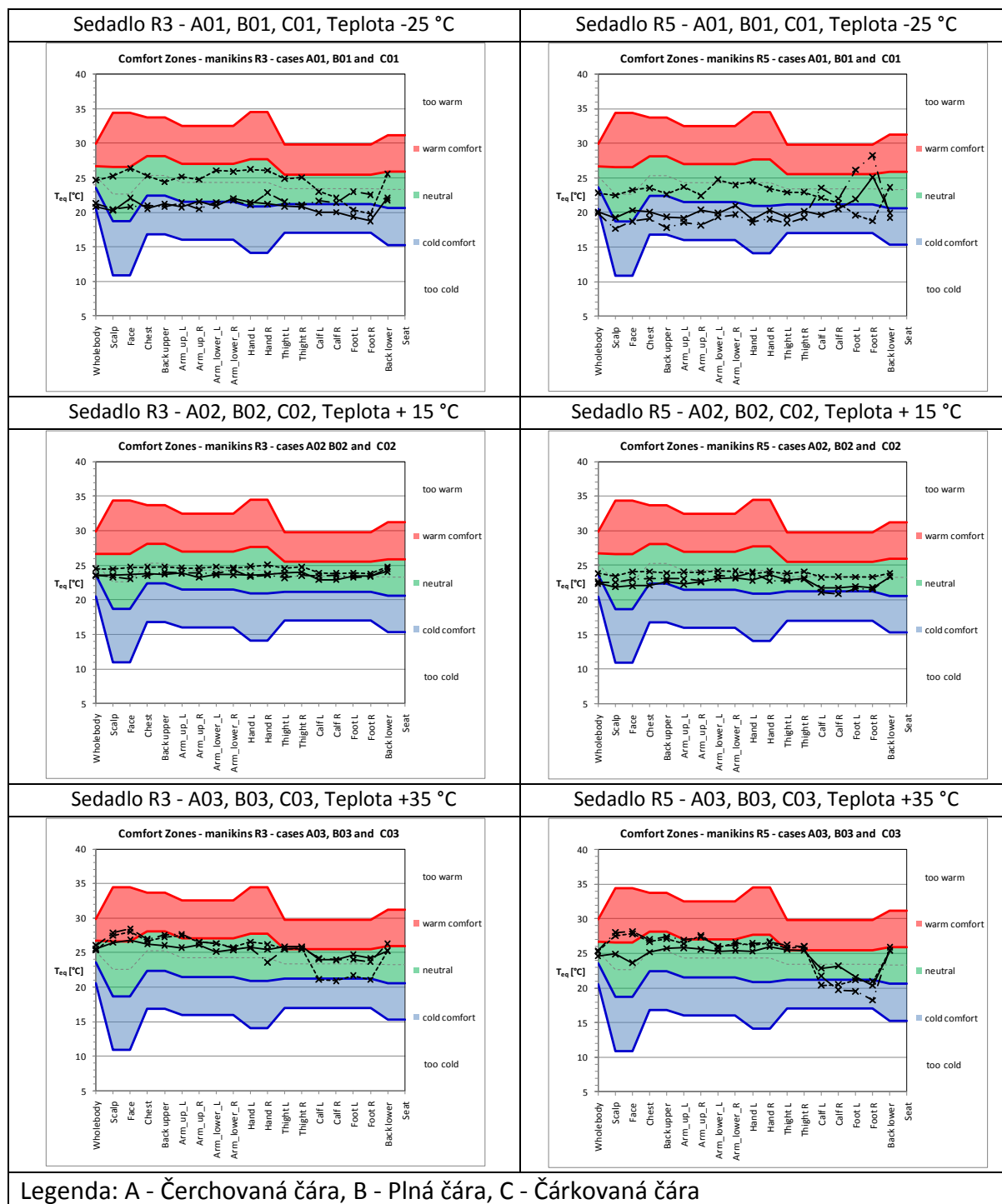
Tab. 11.3.3-3 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Figurína	L1			R1			L3			R3			R5		
	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
C01	-1	9	N	-1	7	N	0	14	N	0	15	N	-1	14	N
C02	0	17	A	0	17	A	0	17	A	0	17	A	0	17	A
C03	0	13	N	0	12	N	0	10	N	0	13	N	0	9	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

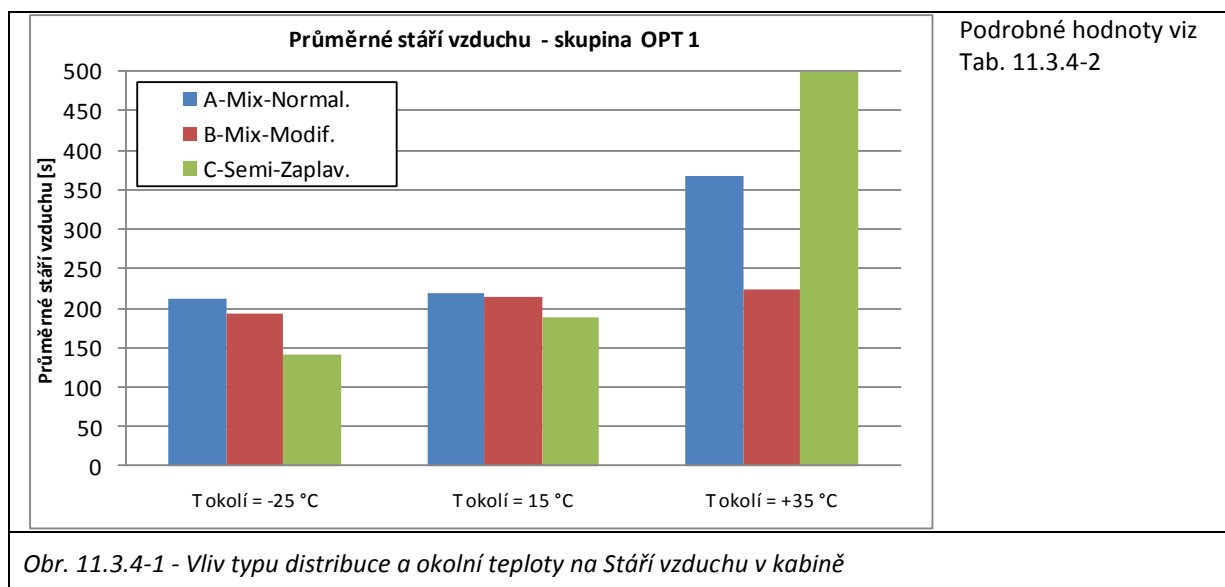
11.3.4 Závěrečné shrnutí vyhodnocení výsledků skupiny OPT 1

Tab. 11.3.4-1 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro případy A, B a C



Vyhodnocení výsledků: V posledním porovnání diagramů komfortních zón v kapitole 11.3 jsou vyneseny ekvivalentní teploty všech částí těla pro všechny okolní teploty, všechny typy distribuce, ale pouze pro sedadla R3 a R5 (viz Tab. 11.3.4-1). Z grafů je patrné, že všechny tři typy distribuce poskytují velice dobré tepelné mikroklima v případě okolní teploty +15 °C, relativně dobrá je situace i v případě chlazení při okolní teplotě +35 °C a nejhoršího

celkového výsledku je dosaženo při okolních podmínkách $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$. Nejvíce částí v neutrální zóně je v případě využití Semizaplavovacího větrání, ovšem z principu distribuce jsou problematické především části dolních končetin a chodidla. Směšovací větrání vykazuje nejslabší výsledek v případě okolní teploty $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a to jak v celkovém tepelném pocitu tak v podobě nežádoucího ovlivňování lokální ekvivalentní teploty dolních končetin na sedadle R5. Modifikované směšovací větrání vykazuje lepší lokální tepelné pocity než větrání směšovací a v případech chlazení kabiny rovnoměrnější tepelné mikroklima na posuzovaných sedadlech než Semizaplavovací větrání. Důležitým parametrem kvality mikroklimatu je však nejen posouzení tepelné pohody, ale také kvality větrání.



Průměrné hodnoty indexu Stáří vzduchu jsou porovnány v grafu na obrázku 11.3.4-1. Při celkovém objemu vzduchu v kabině $14,99\text{ m}^3$ a dodávce $66,5\text{ l/s}$ větracího vzduchu je průměrná doba jedné výměny rovna 225 s , což je i hraniční hodnota pro posouzení kvality větrání. Z grafu je patrné, že nejstabilnější větrání interiéru kabiny poskytuje Modifikované směšovací větrání, které při všech variantách okolní teploty vykazuje průměrnou hodnotu stáří vzduchu cca 200s. Směšovací větrání poskytuje dostatečné větrání při teplotách $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ a $+15\text{ }^{\circ}\text{C}$, ale při okolní teplotě $+35\text{ }^{\circ}\text{C}$ dosahuje průměrná hodnota 366 s , což je nad zvolenou hranicí. U Semizaplavovacího větrání je stáří vzduchu silně závislé na okolních podmínkách a zatímco pro nízké teploty je kvalita větrání nejlepší, pro vysoké okolní teploty přesahuje stanovenou hranici dvojnásobně v důsledku teplotní stratifikace vzduchu v kabině.

Shrnutí výsledků: Z uvedených výsledků kapitoly 11.3 lze učinit závěr, že z posuzovaných typů distribuce vzduchu byla vyhodnocena jako nejperspektivnější varianta Modifikované směšovací větrání, neboť poskytuje nejvyrovnanější výsledky jak pro tepelnou pohodu tak kvalitu větrání při všech zkoumaných provozních podmínkách malých letadel. Skupina OPT2 proto byla zaměřena především na posouzení vlastností a výkonnosti toho typu větrání v závislosti na geometrii výustek a příváděcích vzduchovodů.

Tab. 11.3.4-2 - Průměrné hodnoty, index stáří vzduchu - skupina OPT 1

Případ Figurína	Mix-norml			Mix-Modif			Semi-zaplavovací		
	A01	A02	A03	B01	B02	B03	C01	C02	C03
L1	251	265	313	184	213	180	169	265	534
R1	240	276	353	189	219	214	179	298	527
L2	206	208	333	186	230	254	149	157	468
R2	231	217	385	195	245	220	110	198	428
L3	206	224	323	196	215	264	132	171	347
R3	198	223	341	212	209	228	110	146	475
L4	195	183	452	192	192	246	141	138	558
R4	186	187	362	196	206	230	137	148	552
R5	202	191	436	183	194	178	147	180	608
průměr	213	219	366	193	214	224	142	189	500

Legenda : číselné hodnoty v tabulce jsou rovny indexu stáří vzduchu [s] ve výšce hlavy 110 cm na podlahou

11.4 Optimalizace geometrie distribučních vzduchovodů

Kapitola pojednává o vlivu geometrie přírodních vzduchovodů a výustek na distribuci vzduchu a tím i mikroklima a tepelnou pohodu v kabině. Na základě výsledků simulací z hlavní skupiny OPT1 byly autorem vybrány pro optimalizaci vzduchovody směšovacího větracího systému a především pak vzduchovody, výustky a umístění výustek Modifikovaného směšovacího větracího systému. Přírodní vzduchovody Semizaplavovacího větracího systému nebyly optimalizovány, neboť vzhledem k velké ploše výustky a nízkým výstupním rychlostem má geometrie přírodních vzduchovodů jen malý vliv na výsledné proudové pole v kabině.

Základní popis modelových případů skupiny OPT 2 je uveden v tabulce 11.1-5. Označení jednotlivých modelových případů a nastavení okrajových podmínek je pak uvedeno v tabulce 11.4-1.

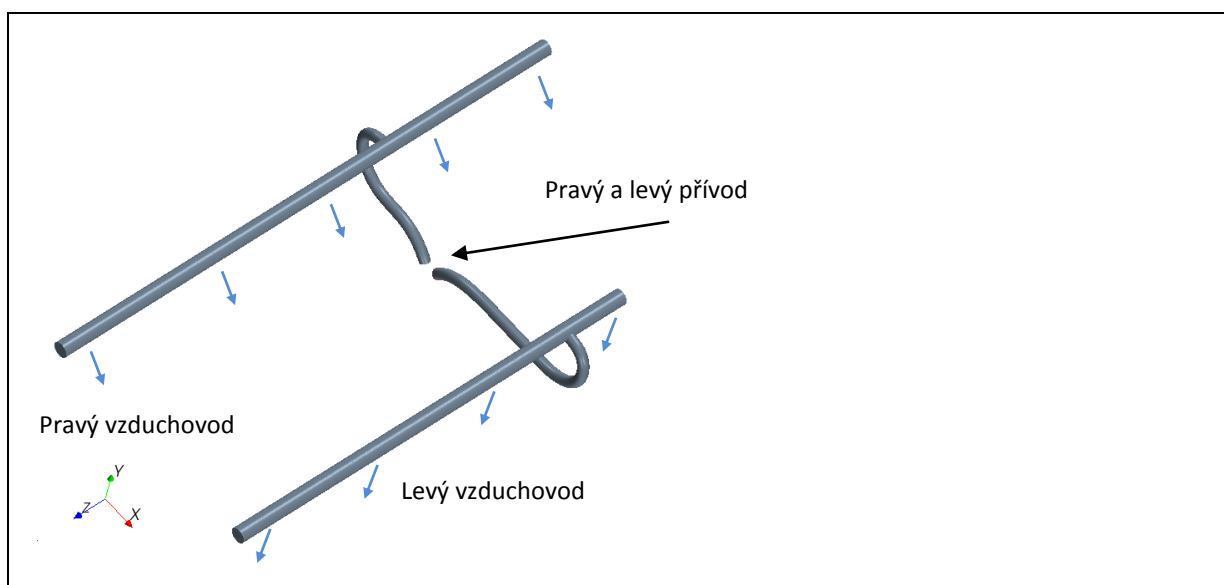
- Případy podskupin A a B byly zaměřeny na vyhodnocení vlivu umístění připojovacího T-kusu na distribuci vzduchu do kabiny. Bližší popis geometrie, získané výsledky a vyhodnocení jsou popsány v podkapitole 11.4.1.
- Případy podskupin B, F, G a B02-OPT1 byly porovnány vzájemně s cílem vyhodnotit vliv umístění a typ připojení na distribuci vzduchu do kabiny v případě modifikovaného směšovacího větrání. Bližší popis geometrií, získané výsledky a vyhodnocení jsou popsány v podkapitole 11.4.2.
- Posední ucelenou podskupinu tvoří případy D a E, které byly porovnány vzájemně s cílem vyhodnotit vliv geometrie výustek na distribuci vzduchu a tepelnou pohodu v kabině v případě Modifikovaného směšovacího větrání. Bližší popis geometrií, získané výsledky a vyhodnocení jsou popsány v podkapitole 11.4.3.

Tab. 11.4-1 - Podskupina skupiny OPT 2 - Nastavení okrajových podmínek

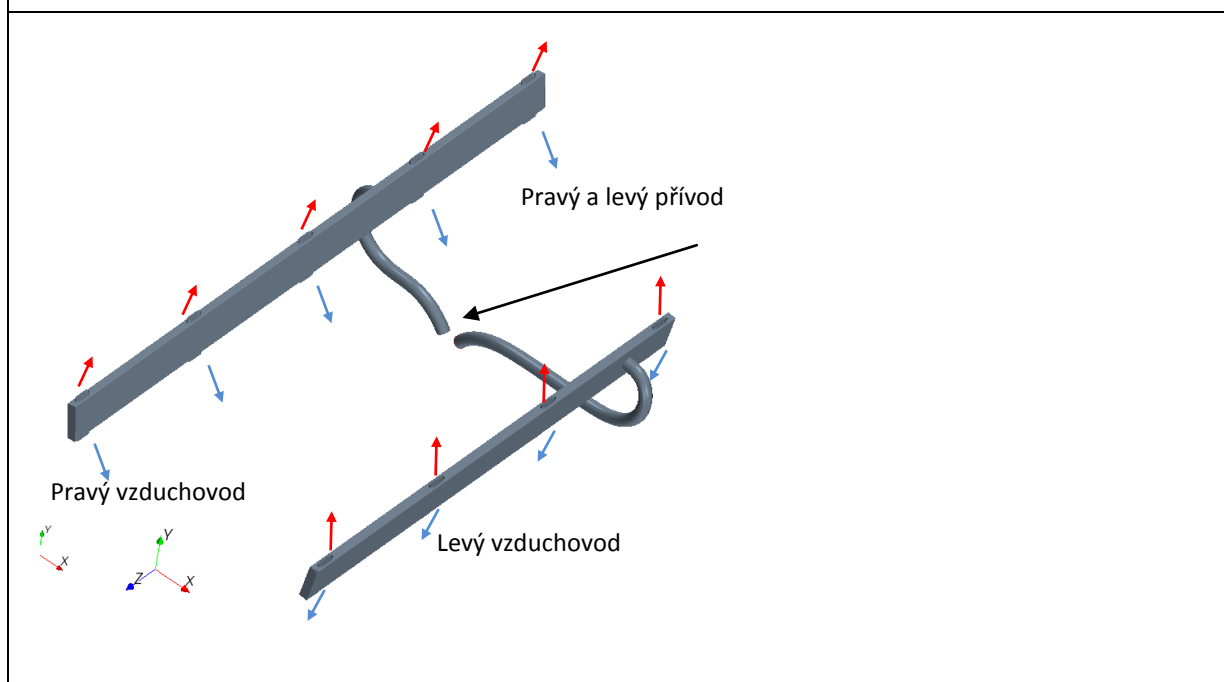
Podskupina	Případ	Teplota okolí [°C]	Teplota větracího vzduchu [°C]	Rychlost vstup pravý/levý [m/s]	Objem. tok [l/s]	Hmot. tok [kg/s]
A-Mix-Normal	A02	+15 °C	26,0	10,41/8,18	66,5	0,0759
B-Mix-Modif	B02	+15 °C	26,0	10,41/8,18	66,5	0,0759
D-Mix-Modif	D01	- 25 °C	47,4	10,41/8,18	66,5	0,0708
	D02	+15 °C	26,0	10,41/8,18	66,5	0,0759
E-Mix-Modif	E01	- 25 °C	47,4	10,41/8,18	66,5	0,0708
	E02	+15 °C	26,0	10,41/8,18	66,5	0,0759
F-Mix-Modif	F02	+15 °C	26,0	3,49/2,74	66,5	0,0759
G-Mix-Modif	G01	- 25 °C	47,4	3,49/2,74	66,5	0,0708
G-Mix-Modif	G02	+15 °C	26,0	3,49/2,74	66,5	0,0759

11.4.1 Vliv umístění připojovacího T-kusu

Modelové případy podskupiny byly navrženy tak, aby bylo možné porovnat vliv polohy/umístění připojovacího T-kusu na mikroklima v kabině. Jako referenční byl zvolen modelový případ OPT1-A02 Směšovací větrání s připojením přívadčícího T-kusu doprostřed vzduchovodu mezi výustky L-2/ L-3 a P-2/P-3 (viz Obr. 11.3.1-1). Po přesunutí připojovacího T-kusu do zadní části vzduchovodu mezi výustky L-3/L-4 a P-3/P-4 vznikla nová geometrie a modelový případ s označením OPT2-A02. Geometrie a umístění T-kusu viz obrázek 11.4.1-1. Obdobně byla upravena geometrie modelového případu OPT1-B01 čímž vznikl modelový případ OPT2-B02. Geometrie a umístění T-kusu viz obrázek 11.4.1-2.



Obr. 11.4.1-1 - Směšovací větrání - geometrie pro zadní umístění přívodních T-kusů



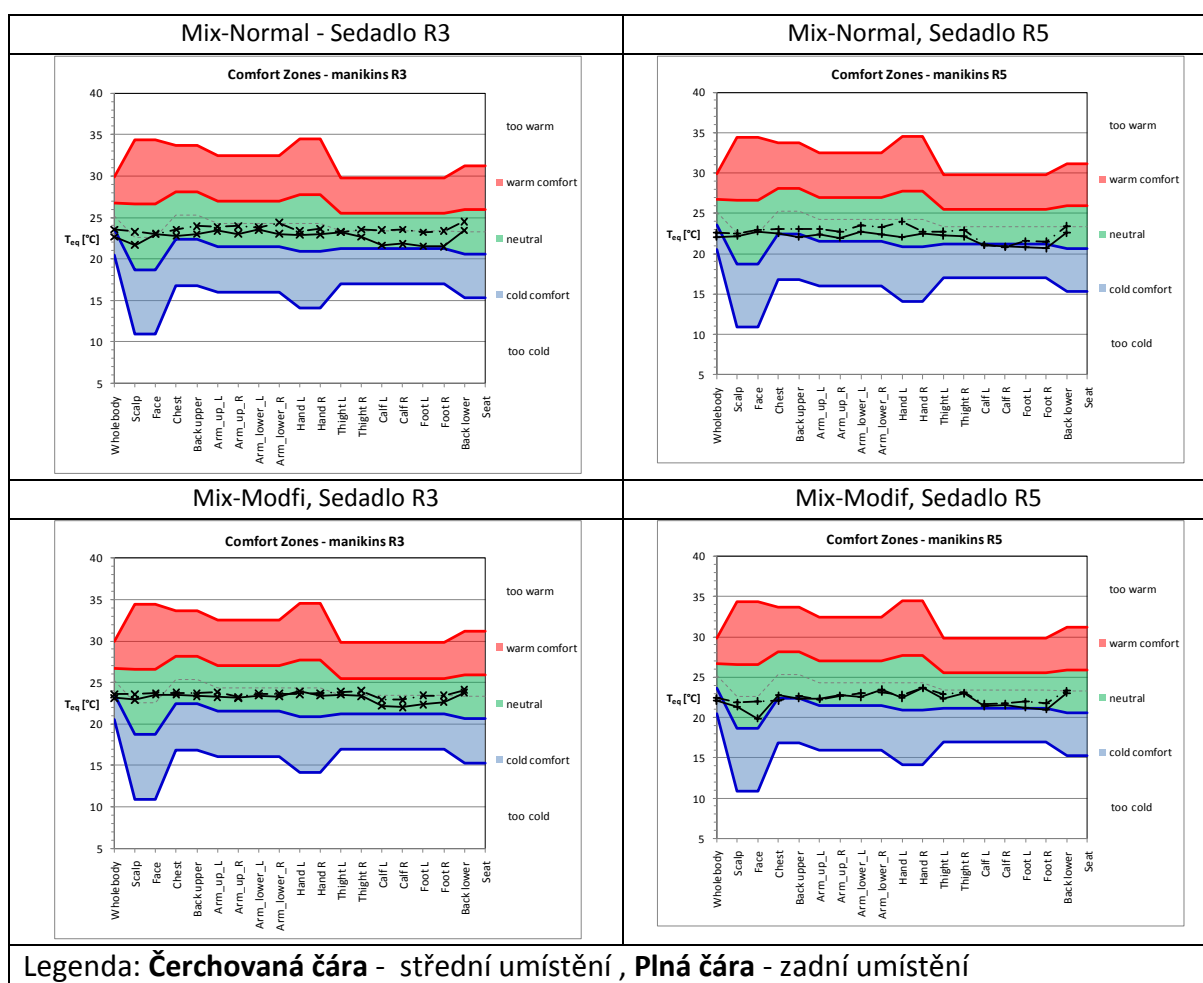
Obr. 11.4.1-2 - Modifikované směšovací větrání - geometrie pro zadní umístění přívodních T-kusů

Porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů OPT2-A02, OPT2-B02, OPT1-A02 a OPT1-B01 je uvedeno v diagramech komfortních zón (viz Tab.-11.4.1-1) a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu jsou vyčísleny v tabulce 11.4.1-2.

Modifikované směšovací větrání: Z diagramů i tabulky je patrné, že vliv umístění přívodního T-kusu na tepelnou pohodu v případě Modifikovaného směšovacího větrání je relativně malý a rozdíly v ekvivalentních teplotách porovnávaných případů jsou malé.

Směšovací větrání: Jiná je situace u Směšovacího větrání, kde se u sedala R3 vyskytuje v případě zadního umístění nižší ekvivalentní teplota lýtek a nohou. Tyto rozdíly jsou důsledkem změny směrování os primárních proudů (viz Příloha IV - případ A02), kdy následně primární proud z výstky L-3 a P-3 přímo dopadá na tyto části figuríny a způsobuje snížený tepelný komfort.

Tab. 11.4.1-1 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro různé typy umístění připojovacího T-kusu, Teplota okolí 15°C



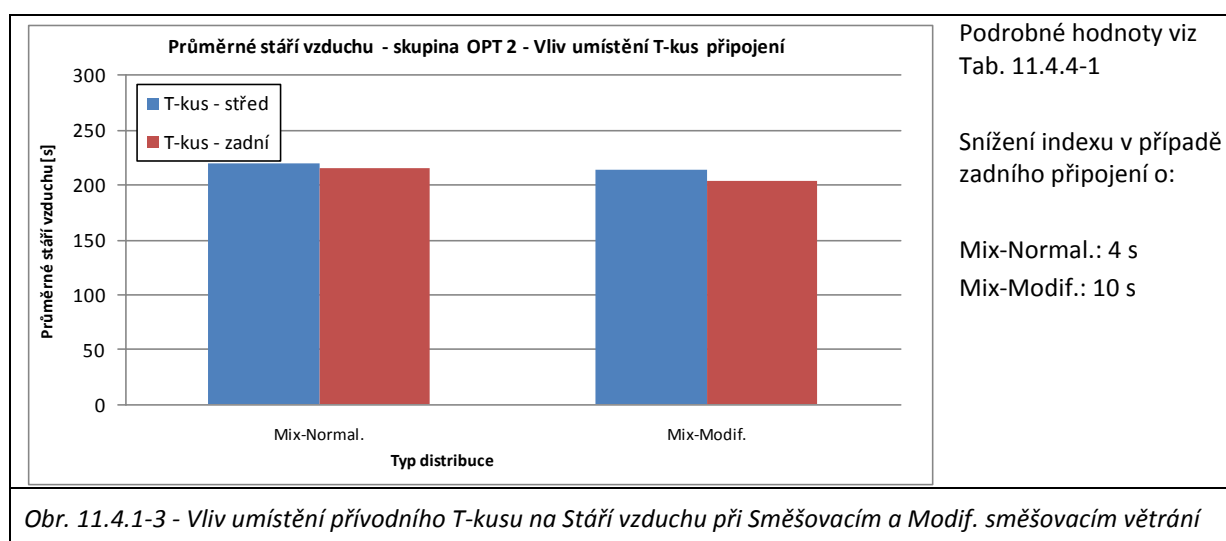
Tab. 11.4.1-2 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Figurína	R3			R5		
	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
Mix-Mormal. - střed	-1	17	N	-1	15	N
Mix-Normal. - zadní	-1	13	N	-1	12	N
Mix-Modif. - střed	0	17	A	-1	16	N
Mix-Modif. - zadní	-1	17	N	-1	14	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

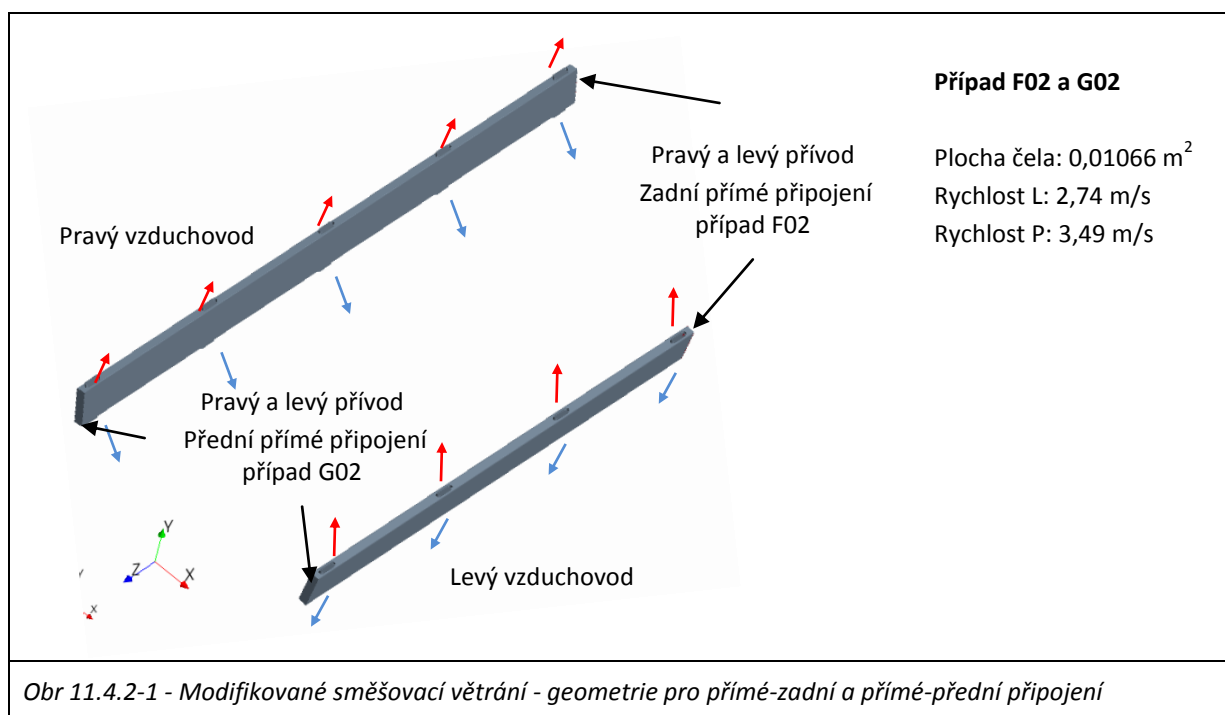
Průměrné hodnoty indexu Stáří vzduchu jsou porovnány v grafu na obrázku 11.4.1-3. Je patrné, že u obou typů Směšovacího větrání má zadní připojení pozitivní vliv na kvalitu větrání v kabině v podobě snížení průměrné hodnoty indexu Stáří vzduchu. V případě Směšovacího větrání se průměrné stáří vzduchu sníží o 4 s v případě Modifikovaného směšovacího větrání o 10 s. Přidanou hodnotou zadního připojení je především u Směšovacího větrání také fakt, že je lépe provětrávána především přední část kabiny pro cestující a oblasti vysokého indexu Stáří vzduchu se vyskytují pouze v zavazadlovém prostoru, kde však osoby cestující v kabině běžně nepobývají (viz příloha III - případ A02 a příloha IV - případ A02). Zadní umístění přívodu u Modifikovaného směšovacího větrání nehraje tak významnou roli pro celkové rozložení indexu Stáří vzduchu, protože v důsledku přítomnosti horních výustek, které přivádějí vzduch podél stěn do horní části kabiny, je toto řešení méně citlivé na umístění připojení přívodního potrubí. (viz příloha III - případ B02 a příloha IV - případ B02).

Shrnutí výsledků: Porovnání výsledků z kapitoly 11.4.1 lze shrnout do konstatování, že zadní umístění připojovacího T-kusu má jen zanedbatelný vliv na tepelnou pohodu posuzovaných případů a v případě kvality větrání má větší dopad na Směšovací větrání. V případě Modifikovaného směšovacího větrání je vliv na kvalitu větrání i tepelnou pohodu malý a tento způsob distribuce se jeví jako více robustní.

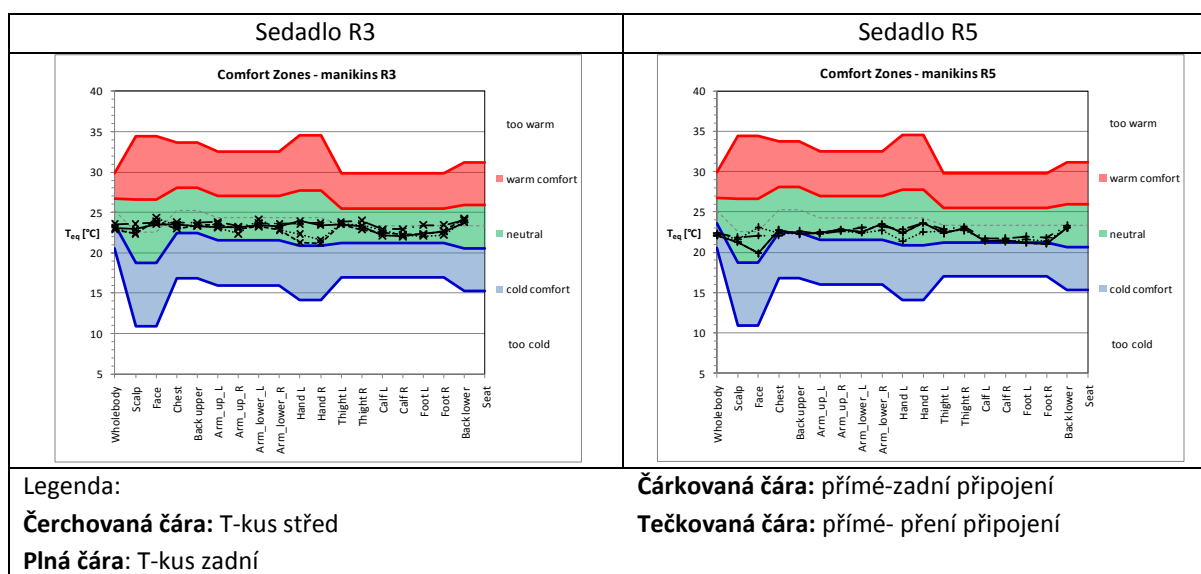


11.4.2 Vliv typu připojení na výkon Modifikovaného směšovacího větrání

Dle výsledků kapitoly 11.4.1 je Modifikované směšovací větrání velice málo závislé na umístění přírodního T-kusu po délce hlavních vzduchovodů. Cílem kapitoly 11.4.2 bylo tedy porovnat i jiné typy připojení přívaděcího potrubí a poskytnout tak širší náhled na výkon tohoto typu distribuce. Byly tedy vytvořeny typy připojení přívaděcího potrubí Zadní přímé - modelový případ OPT2-F02 a Přední přímé - modelový případ OPT2-G02. Modifikace spočívala v odstranění přívaděcích potrubí a předepsání okrajové podmínky typu inlet na přední nebo zadní čela vzduchovodů (viz Obr. 11.4.2-1). Rychlosti proudění předepsané na okrajové podmínky byly upraveny dle světlého průřezu vzduchovodů - viz Tab. 11.4.1-1.



Tab. 11.4.2-1 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro různé typy připojení vzduchovodů při modifikovaném směšovacím větrání, teplota okolí 15°C



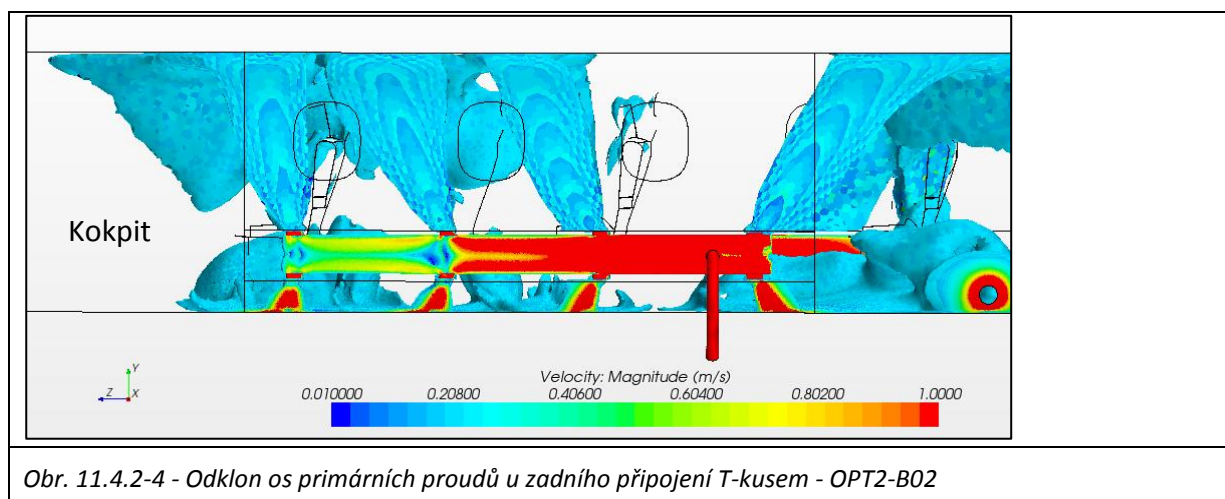
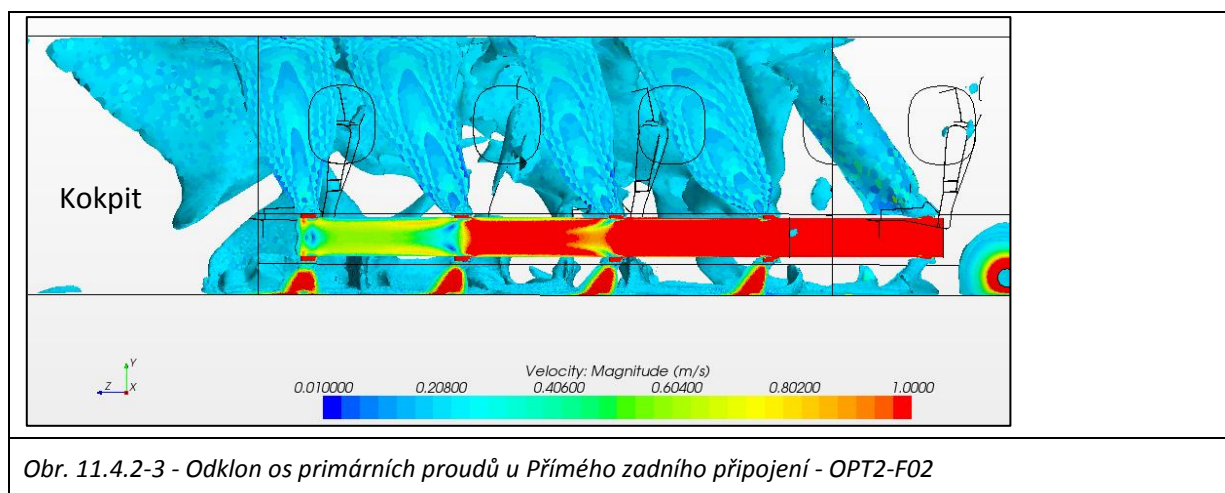
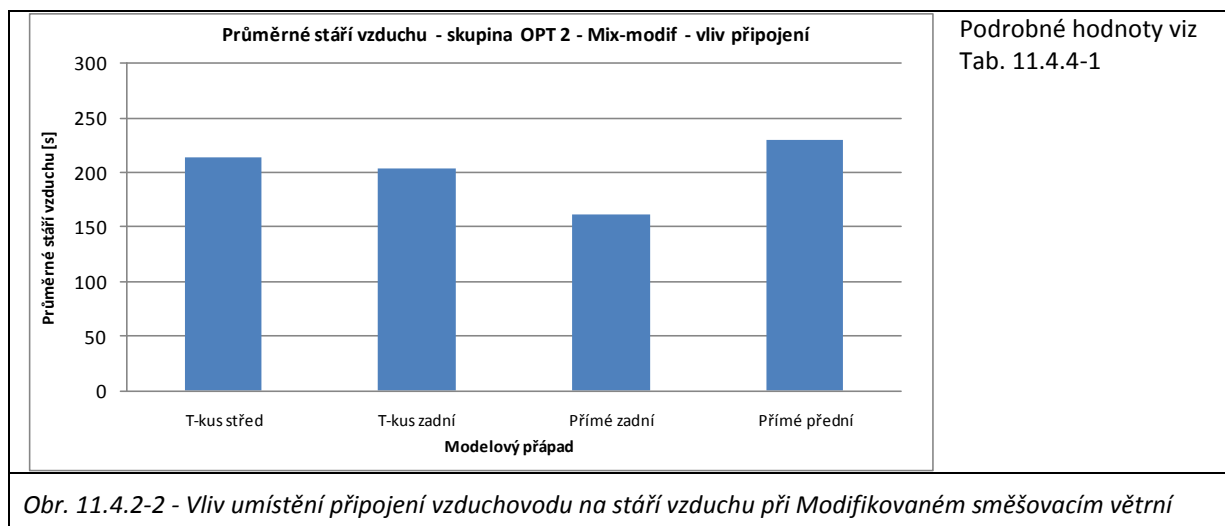
Tab. 11.4.2-2 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Figurína	R3			R5		
	CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
Mix-Modif. - střed	0	17	A	-1	16	N
Mix-Modif. - zadní	-1	17	N	-1	16	N
Mix-Modif. - zadní přímé	-1	17	N	-1	16	N
Mix-Modif. - přední přímé	-1	17	N	-1	17	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

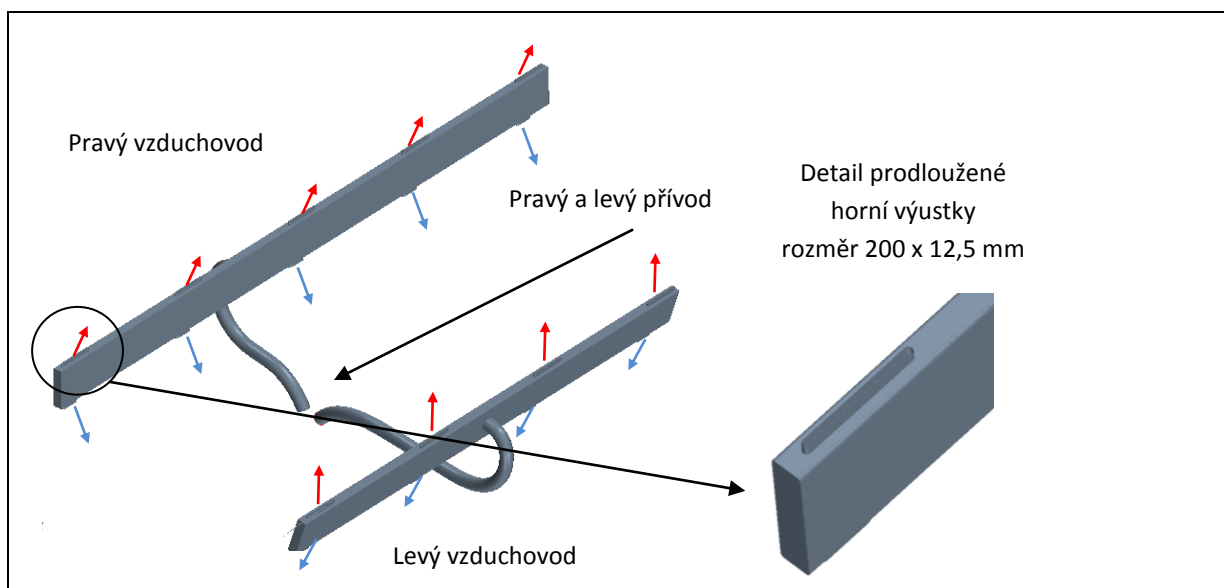
Porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů OPT1-B02, OPT2-B02, OPT2-F02 a OPT2-G02 je uvedeno v diagramech komfortních zón (viz Tab. 11.4.2-1) a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu jsou vyčísleny v tabulce 11.4.2-2. Z diagramů i tabulky je patrné, že vliv změny typu připojení na tepelnou pohodu v případě Modifikovaného směšovacího větrání je relativně malý a rozdíly v ekvivalentních teplotách porovnávaných případů jsou nízké. Většina hodnot lokálních tepelných pocitů je u všech vyšetřovaných případů v neutrální oblasti až na část hrudník sedadla R5. Pro přední přímé připojení jsou všechny lokální tepelné pocity v neutrální oblasti, ovšem ani tak není dosaženo celkového tepelného komfortu, protože většina tepelných pocitů je v blízkosti přechodu mezi neutrální oblastí a oblastí mírně chladno. Průměrné hodnoty indexu stárí vzduchu jsou uvedeny na obrázku 11.4.2-2. Nejnížší průměrné hodnoty je dosahováno při typu připojení Přímé zadní (OPT2-F02), což je především důsledkem změny směrování os hlavních proudů do přední části kabiny (viz Obr. 11.4.2-3 a Příloha IV - případ F02) a tím pádem lepšího provětrání předních částí kabiny. Podobný fenomén byl pozorován již u modelového případu OPT2-B02, nicméně efekt nebyl tak silný, neboť vzhledem k umístění přívodního potrubí byly osy proudů z výustek L4, P4 a P5 odkloněny do zadní části kabiny a nepřiváděly tak vzduch do pobytové části kabiny (viz Obr. 11.4.2-4 a Příloha IV - případ B02).

Shrnutí výsledků: Z výsledků kapitoly 11.4.2 vyplývá, že umístění připojení přívodního potrubí do hlavních vzduchovodů a typ připojení výrazně ovlivňuje především směrování os primárních proudů z distribučních výustek. Nicméně díky principu přívodu vzduchu do kabiny spodními a horními výustkami, má tento faktor relativně malý vliv na výkon Modifikovaného směšovacího větrání. Pokud by bylo požadavkem optimalizace navrhnout systém s co nejlepší kvalitou větrání, pak lze jako neperspektivnější volit Přímé zadní připojení. Z pohledu tepelné pohody nebylo pozorováno zásadnější ovlivnění lokální tepelné pohody v závislosti na typu připojení. Tento fakt pramení opět především z principu distribuce vzduchu více výustkami a také z principu přilnutí proudů z horních výustek ke stěnám kabiny. Primární proudy z horních výustek pak přímo nedopadají na horní části figurín a nezpůsobují tak nežádoucí ochlazování pociťované jako průvan.

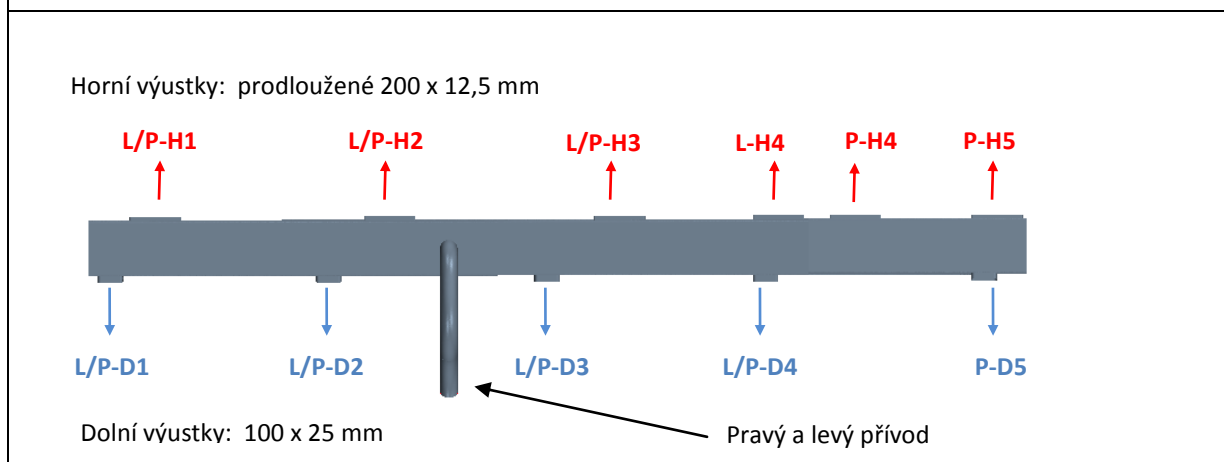


11.4.3 Vliv geometrie výustek na výkon Modifikovaného směšovacího větrání

Dalším možným činitelem, který ovlivňuje kvalitu větrání a tepelnou pohodu je geometrie distribučních výustek, jejich počet, umístění a připojení na hlavní distribuční vzduchovody. Cílem kapitoly 11.4.3 bylo porovnat i jiné typy geometrií distribučních výustek a alternativní způsob připojení na hlavní vzduchovody. Byla vytvořena geometrie s prodlouženým tvarem horních výustek při zachování volné plochy výustky s rozměry 200 x 12,5 mm (modelový případ OPT2-D01 a D02). Cílem této modifikace bylo zvětšit šířku horních primárních proudů a lépe tak chránit horní část těla, nacházející se v blízkosti stěny kabiny, před chladem. Protože dolní výustky mají přivádět větrací vzduch především do prostoru nohou a horní by měly přivádět vzduchu především do prostoru v blízkosti hlavy, byla vytvořena geometrie se střídavým umístěním dolních a horních výustek. Poloha nohou a hlavy je u sedícího člověka při bočním pohledu posunuta asi o cca 400 mm. Vzhledem k odklonu primárních proudů a prostorovým omezení však bylo použito celkové posunutí 250 mm.



Obr. 11.4.3-1 - Geometrie s prodlouženou horní výustkou

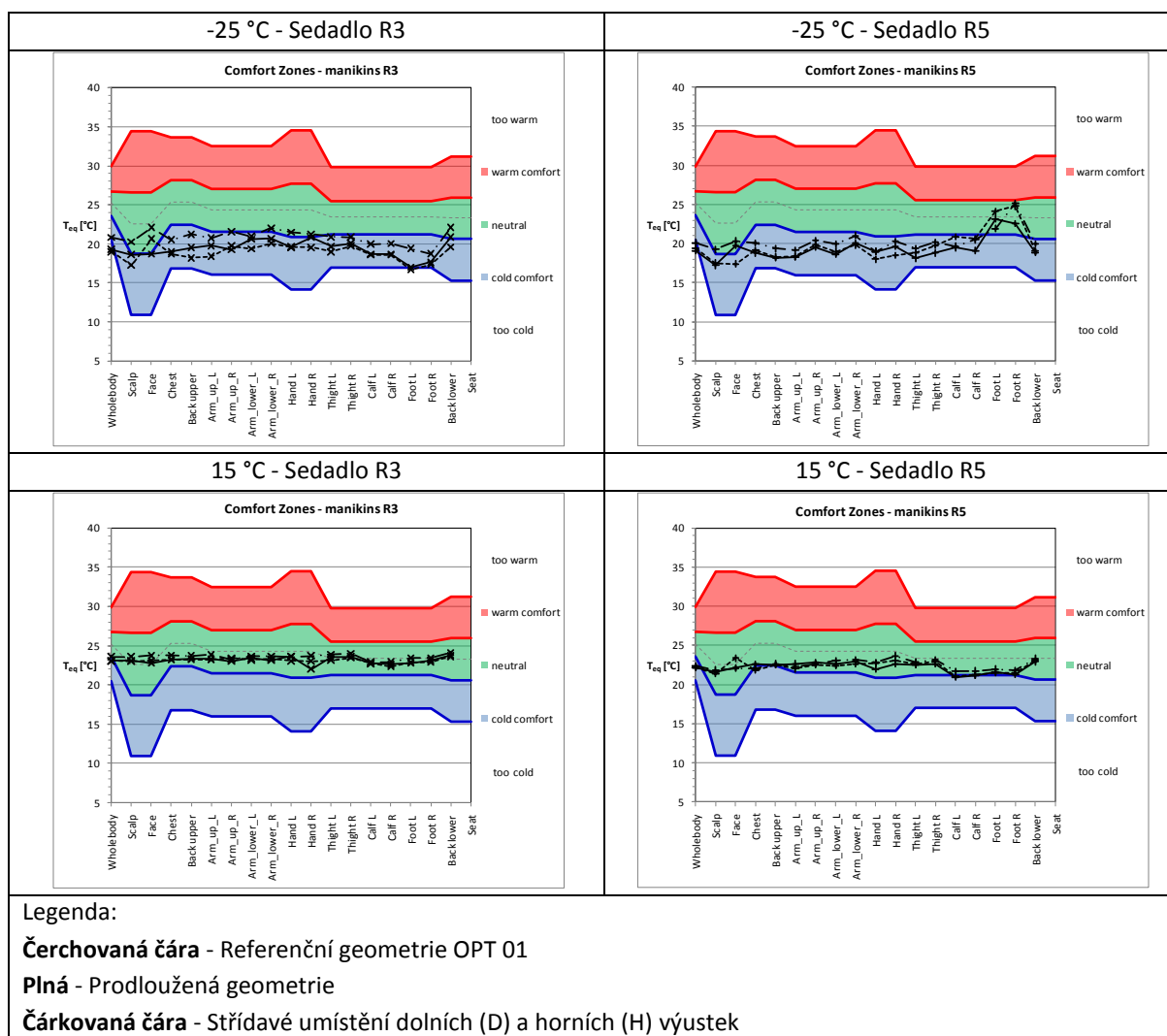


Obr 11.4.3-2 - Umístění horních a dolních výustek při střídavém umístění výustek

Porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů OPT2-D01, OPT2-D02, OPT2-E01 a OPT2-E02 je uvedeno v diagramech komfortních zón (viz Tab. 11.4.3-1) a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu jsou uvedeny v tabulce 11.4.3-2.

Z diagramů i tabulky je patrné, že vliv změny geometrie horní výustky i její polohy na tepelnou pohodu je při okolní teplotě 15 °C zanedbatelný a malé rozdíly se objevují pouze na části Obličej, ovšem změny jsou pouze v rámci neutrální zóny. Výraznější efekt lze, ale pozorovat v případě okolní teploty -25 °C. Za těchto podmínek jsou ekvivalentní teploty prakticky na všech částech těla nižší než u referenčního případu OPT1-B01 a tím je nižší i celková tepelná pohoda. Toto snížení je vyvoláno pravděpodobně skutečností, že v důsledku větší šířky horního proudu a tím i větší kontaktní plochy se stěnou, je zintenzivněn přenos tepla mezi stěnou a proudem a důsledkem je nižší celková teplota v kabině letounu (viz Příloha IV - případ D01 a E01 a Příloha III - případ B01). Experimentem tak byl falsifikován předpoklad z úvodu podkapitoly a rozšíření horní výustky či jejich posunutí nemělo pozitivní vliv na tepelnou pohodu cestujících v kabině.

Tab. 11.4.3-1 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro různé typy geometrií distribučních výustek, Teplota okolí -25 a 15°C

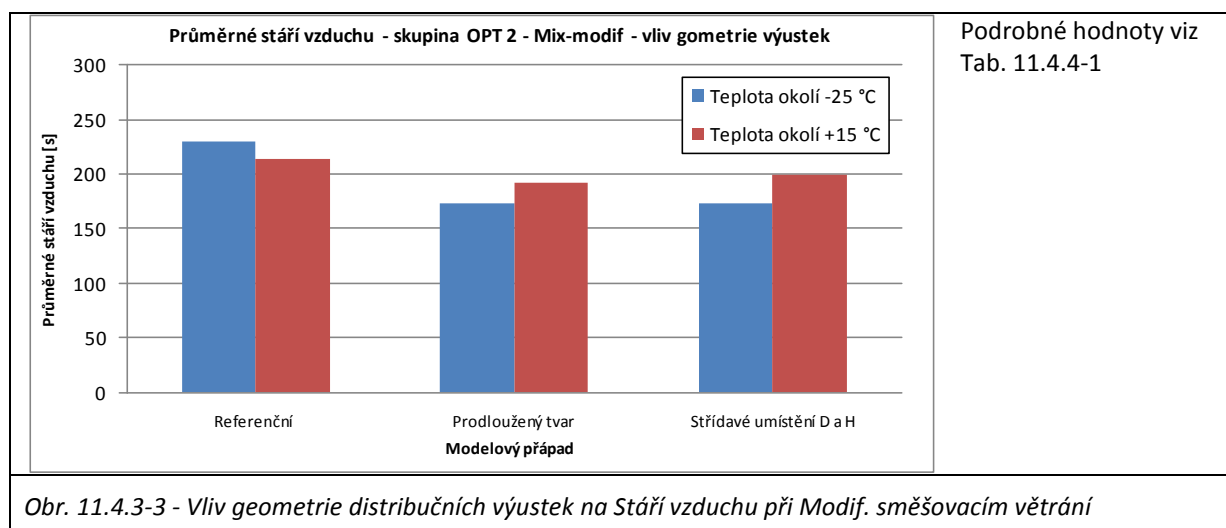


Tab. 11.4.3-2 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Typ okrajových podmínek	Figurína	R3			R5		
		CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
Teplota okolí -25 °C	Mix-Modif. - referenční	-1	8	A	-1	4	N
	Mix-Modif. - prodloužená	-2	1	N	-2	3	N
	Mix-Modif. - střídavé	-2	1	N	-2	2	N
Teplota okolí +15 °C	Mix-Modif. - referenční	0	17	A	-1	17	N
	Mix-Modif. - prodloužená	-1	17	N	-1	15	N
	Mix-Modif. - střídavé	-1	17	N	-1	16	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

Průměrné hodnoty indexu stáří vzduchu jsou uvedeny na obrázku 11.4.3-3. V obou modelových případech s prodlouženou geometrií horních výustek je patrný pokles průměrné hodnoty indexu stáří vzduchu a to především při okolní teplotě -25 °C. Protože jsou proudy z prodloužených horních výustek lépe přilnuty ke stěnám, přivádějí více čerstvého vzduchu ke stropu a do horní části kabiny. To se pak projeví především ve sníženém indexu stáří vzduchu ve výšce hlavy (110 cm).



Shrnutí výsledků: Prodloužení geometrie horních výustek (modelový případ OPT2-D01 a D02) a úprava jejich umístění na hlavních vzduchovodech (modelový případ OPT2-E01 a E02) snižuje především průměrnou hodnotu indexu stáří vzduchu v kabině. Očekávaný pozitivní efekt na tepelnou pohodu při nízkých okolních teplotách se nepotvrdil, ale naopak systém vykázal horší hodnoty celkové tepelné pohody než systém referenční (OPT1-B01). Zlepšení tepelné pohody by pravděpodobně bylo možné dosáhnout vyšší teplotou přiváděného vzduchu, ale tato možnost nebyla vzhledem k omezením rozsahu kombinační matice modelových případů zkoumána. Je také potřeba podotknout, že při zvýšení teploty přiváděného vzduchu by vzrostla tepelná ztráta kabiny a tím i energetické nároky na její vytápění, což je však vzhledem k ekonomice provozu letadel není žádoucí.

11.4.4 Závěrečné shrnutí vyhodnocení výsledků skupiny OPT 2

V optimalizační skupině OPT2 byly prozkoumány vlivy změn geometrie přívodních vzduchovodů a výustek na distribuci vzduchu a tepelnou pohodu v kabině. Na základě zjištění ze simulací lze v souhrnu konstatovat

- Zadní umístění připojovacího T-kusu má jen zanedbatelný vliv na tepelnou pohodu posuzovaných případů a v případě kvality větrání má větší dopad na Směšovací větrání. V případě Modifikovaného směšovacího větrání je vliv na kvalitu větrání i tepelnou pohodu malý.
- Umístění připojení přívodního potrubí do hlavních vzduchovodů a typ připojení výrazně ovlivňuje především směrování os primárních proudů z distribučních výustek. Nicméně díky principu přívodu vzduchu do kabiny spodními a horními výustkami, má tento faktor relativně malý vliv na výkon Modifikovaného směšovacího větrání.
- Prodloužení geometrie horních výustek a jejich střídavé umístění na hlavních vzduchovodech snižuje průměrnou hodnotu indexu stáří vzduchu v kabině, ovšem vykazuje horší hodnoty celkové tepelné pohody než systém s referenční uspořádáním Modifikovaného směšovacího větrání.

Experimenty v optimalizační skupině OPT2 prokázaly především robustnost systému Modifikovaného směšovacího větrání při různých okolích i konstrukčních podmínkách. Referenční geometrie výustek a souměrné umístění na vzduchovodu (geometrie modelového případu OPT1-B) se ze zkoumaných variant geometrie jeví jako optimální řešení jak z hlediska kvality větrání tak z hlediska tepelné pohody v kabině.

Tab. 11.4.4-1 - Kvalita větrání - indexu stáří vzduchu - skupina OPT 2

Případ Figurína	Mix-norm.	Mix-Modif							
	A02	B02	D01	D02	E01	E02	F02	G01	G02
EL1	216	214	152	171	168	180	170	207	279
R1	196	208	192	191	175	208	167	192	361
L2	190	185	169	182	175	187	140	174	231
R2	205	193	173	199	173	227	170	174	235
L3	224	191	180	213	181	235	142	186	208
R3	211	192	189	212	189	223	149	173	204
L4	257	214	168	193	176	176	165	167	169
R4	205	227	158	192	162	187	161	177	192
R5	234	214	177	181	163	173	185	156	197
průměr	215	204	173	193	174	199	161	178	231

Legenda : číselné hodnoty v tabulce jsou rovny indexu stáří vzduchu [s] ve výšce hlavy 110 cm na podlahou

11.5 Optimalizace tloušťky tepelné izolace

Kapitola je zaměřena na vliv tloušťky tepel. izolace ve stěnách, stropu a podlaze kabiny na vnitřní mikroklima a tepelnou pohodu. Na základě výsledků simulací z hlavní skupiny OPT1 byly vybrány pro posouzení vlivu tři základní skladby izolace označené jako Minimální, Střední a Vysoká a jedna doplňková skladba izolace označená jako Maximální, využitá pouze v kombinaci se Semizaplavovacím větráním. Všechny modelové případy definované pro skupinu OPT3 včetně nastavení hlavních okrajových podmínek uvádí tabulka 11.5-1

Tab. 11.5-1 - Podskupina skupiny OPT 3 - Nastavení okrajových podmínek

Podskupina	Případ	Teplota okolí [°C]	Teplota větracího vzduchu [°C]	Rychlost vstup pravý/levý [m/s]	Objem. tok [l/s]	Hmot. tok [kg/s]
A-Mix-Normal	A01	-25 °C	60,2	10,41/8,18	66,5	0,0681
	A02	+35 °C	13,0	10,41/8,18	66,5	0,0793
	A03	-25 °C	53,4	10,41/8,18	66,5	0,0695
	A04	+35 °C	15,3	10,41/8,18	66,5	0,0787
B-Mix-Modif	B01	-25 °C	60,2	10,41/8,18	66,5	0,0681
	B02	+35 °C	13,0	10,41/8,18	66,5	0,0793
	B03	-25 °C	53,2	10,41/8,18	66,5	0,0695
	B04	+35 °C	15,3	10,41/8,18	66,5	0,0787
C-Velkoplošná	C01	-25 °C	60,0	10,41/8,18	66,5	0,0681
	C02	+35 °C	14,2	0,042	66,5	0,0790
	C03	-25 °C	51,1	0,042	66,5	0,0700
	C04	+35 °C	15,7	0,042	66,5	0,0786
	C07	-25 °C	44,7	0,042	66,5	0,0714
	C08	+35 °C	16,9	0,042	66,5	0,0783

V tabulce 11.5-2 jsou uvedeny parametry jednotlivých konstrukcí pro případ skladby zateplení označované jako Maximální izolace. Jsou uvedeny pouze konstrukce, které se materiálovým složením liší od standardního (Vysokého) zateplení (viz Tab. 11.2-1). Ve všech hodnotách U_c je započtena hodnota $\alpha = 4 \text{ W/m}^2\text{K}$ a emisivita povrchů je rovna 0,90.

Tab. 11.5-2 - Parametry konstrukcí interiérových panelů - Maximální izolace

Poz.	Část	Plocha [m ²]	Materiál [-]	Tloušťka [mm]	λ [W/mK]	R_c [m ² K/W]	U_c [W/m ² K]
K-1	Kokpit podlaha (celkem)	1,807	-	96	-	1,694	0,514
	materiál konstrukce		Dřevotříska	16	0,170	0,094	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	80	0,050	1,600	-
K-3	Kokpit přepážka	2,221	-	41	-	0,594	1,184
	materiál konstrukce		Dřevotříska	16	0,170	0,094	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
C-1	Kabina podlaha	6,905	-	55	-	1,750	0,500
	materiál konstrukce		Překlička	30	0,200	0,150	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	80	0,050	1,600	-

V tabulce 11.5-3 jsou uvedeny parametry/charakteristiky jednotlivých stěn pro případ skladby zateplení označované jako Minimální izolace, přičemž v tabulce jsou uvedeny pouze konstrukce, které se materiálovým složením liší od standardního (Vysokého) zateplení (viz Tab. 11.2-1) a mají tak jiný součinitel prostupu tepla.

Tab. 11.5-3 - Parametry konstrukcí interiérových panelů - Minimální izolace

Poz.	Část	Plocha [m ²]	Materiál [-]	Tloušťka [mm]	λ [W/mK]	R_c [m ² K/W]	U_c [W/m ² K]
K-1	Kokpit podlaha (celkem)	1,807	-	16	-	0,094	2,907
	materiál konstrukce		Dřevotříska	16	0,170	0,094	-
	materiál tep. izolace		-	-	-	-	-
K-2	Kokpit stěny	3,892	-	27	-	0,525	1,290
	materiál konstrukce		Sololit	2	0,080	0,025	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
K-4	Kokpit strop	1,548	-	29	-	0,550	1,250
	materiál konstrukce		Sololit + karton	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
C-1	Kabina podlaha	6,905	-	30	-	0,150	2,500
	materiál konstrukce		Překližka	30	0,200	0,150	-
	materiál tep. izolace		-	-	-	-	-
C-2	Kabina stěny horní	8,520	-	27	-	0,525	1,290
	materiál konstrukce		Sololit	2	0,080	0,025	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
C-3	Kabina stěny pod vzduch.	1,522	-	27	-	0,525	1,290
	materiál konstrukce		Sololit	2	0,080	0,025	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
C-4	Kabina strop	5,829	-	29	-	0,550	1,250
	materiál konstrukce		Sololit + karton	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
C-6	Kabina dveře	1,698	-	29	-	0,550	1,250
	materiál konstrukce		Sololit	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
Z-1	Zavazadl. prost. podlaha	1,780	-	18	-	0,090	2,941
	materiál konstrukce		Překližka	18	0,200	0,090	-
	materiál tep. izolace		-	-	-	-	-
Z-2	Zavazadl. prost. stěny	2,533	-	27	-	0,525	1,290
	materiál konstrukce		Sololit	2	0,080	0,025	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
Z-4	Zavazadl. prost. strop	1,207	-	29	-	0,550	1,250
	materiál konstrukce		Sololit + karton	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-

- V hodnotě U_c je u všech panelů započten součinitel přestupu tepla konvekce na vnější straně 4 W/m²K.

- Emisivita povrchů všech panelů je rovna hodnotě 0,90.

V tabulce 11.5-4 jsou uvedeny parametry/charakteristiky jednotlivých stěn pro případ skladby zateplení označované jako Střední izolace, přičemž v tabulce jsou uvedeny pouze konstrukce, které se materiálovým složením liší od standardního (Vysokého) zateplení (viz Tab. 11.2-1) a mají tak jiný součinitel prostupu tepla.

Tab. 11.5-4 - Parametry konstrukcí interiérových panelů - Střední izolace

Poz.	Část	Plocha [m ²]	Materiál [-]	Tloušťka [mm]	λ [W/mK]	R_c [m ² K/W]	U_c [W/m ² K]
K-1	Kokpit podlaha (celkem)	1,807	-	16	-	0,094	2,907
	materiál konstrukce		Dřevotříska	16	0,170	0,094	-
	materiál tep. izolace		-	-	-	-	-
C-1	Kabina podlaha	6,905	-	55	-	0,650	1,111
	materiál konstrukce		Překližka	30	0,200	0,150	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
C-4	Kabina strop	5,829	-	29	-	0,550	1,250
	materiál konstrukce		Sololit + karton	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-
Z-4	Zavazadl. prost. strop	1,207	-	29	-	0,550	1,250
	materiál konstrukce		Sololit + karton	4	0,080	0,050	-
	materiál tep. izolace		Izol. vata	25	0,050	0,500	-

- V hodnotě U_c je u všech panelů započten součinitel přestupu tepla konvekcí na vnější straně 4 W/m²K.

- Emisivita povrchů všech panelů je rovna hodnotě 0,90.

Skladba izolace označovaná jako Vysoká byla základní verzí skladby tepelné izolace. Podrobný popis skladby je uveden v kapitole 11.2 a průměrný součinitel prostupu tepla byl $U = 37,2$ W/K. V konstrukční praxi malých letadel, je běžným jevem snaha o co největší úsporu hmotnosti tepelné izolace, což vede k snižování tloušťky izolace či vynecháním izolace na některých konstrukcích. S ohledem na zkušenosti autora s návrhem izolací v reálných letadlech, byla pro prozkoumání vlivu takového minimalistického návrhu vytvořena právě taková skladba izolace označovaná jako Minimální. Průměrný součinitel prostupu tepla pro minimální izolaci byl roven hodnotě $U = 59,4$ W/K a skladba se vyznačovala snížením tloušťky izolací prakticky všech konstrukcích na polovinu, popřípadě jejím úplným vypuštěním. Střední skladba izolace je charakterizovaná vypuštěním tepelné izolace na podlahách a sníženou tloušťkou izolace ve stropu kabiny. V technické praxi bývá tento typ skladby označován jako "optimalizovaný", protože oproti minimální izolaci přináší znatelné snížení tepelné ztráty kabiny ačkoliv nepřítomnost tepelné izolace na podlaze může způsobit tepelnou nepohodu na dolních končetinách, především při nízkých okolních teplotách. Průměrný součinitel prostupu tepla pro střední izolaci je roven hodnotě $U = 44,7$ W/K. Skladba izolace s označením Maximální byla použita pouze u typu distribuce Semizaplavovací větrání, protože výsledky skupiny OPT1-C (viz tabulka 11.3.3-2) vykazaly největší tepelnou nepohodu v oblasti nohou chodidel figurín, při nízkých okolních teplotách. Při Maximální skladbě izolace tak byla zvýšena síla izolantu na podlaze kokpitu, kabiny pro cestující a na přední přepážce, s cílem zvýšit povrchovou teplotu podlah a přední přepážky. Průměrný součinitel prostupu tepla pro maximální izolaci byl roven hodnotě $U = 33,8$ W/K.

11.5.1 Vyhodnocení výsledků skupiny OPT 3

Porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů pro okolní teplotu -25 °C (OPT3-A01, A03, B01, B03, C01, C03 a C07) a všechny typy skladeb tepelné izolace je uvedeno v diagramech komfortních zón (viz Tab. 11.5.1-1) a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu jsou vyčísleny v tabulce 11.5.1-2.

Tab. 11.5.1-1 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro různé tloušťky tepelné izolace a okolní teplotu -25 °C



Z diagramů i tabulky lze vyvodit, že nejmenší vliv na tepelnou pohodu má síla tepelné izolace při využití Semi-zaplavovacího větrání. U tohoto typu distribuce vzduchu nedosáhne celkový tepelný pocit nikdy hodnoty příliš chladno a to ani v kombinaci s minimální tloušťkou tepelné izolace. Problematické jsou ovšem části chodidla a dolní končetiny nacházející se v blízkosti podlahy (větrací vzduch v důsledku vyššího vztlaku a nízké počáteční hybnosti rychle stoupá ke stropu kabiny a nevytápí tak prostor u podlahy). Z tohoto důvodu byla definována skladba Maximální izolace, která zvyšuje sílu tepelné izolace především na podlaze, a která by měla tento problém u Semi-zaplavovacího větrání odstranit. Na diagramech ve spodním řádku tabulky 11.5.1-1 je tečkovanou čarou uveden výsledek tepelných pocitů pro skladbu s Maximální izolací. Je patrné, že u chodidel a dolních končetin se tepelný pocit z oblasti 'příliš chladno' zvýšil na pocit 'chladno ale příjemně' ovšem v důsledku snížení teploty větracího vzduchu poklesly ekvivalentní teploty na ostatní částech těla a na některých se snížil tepelný pocit z 'neutrálně' na 'chladno ale příjemně' (především u figuríny R5).

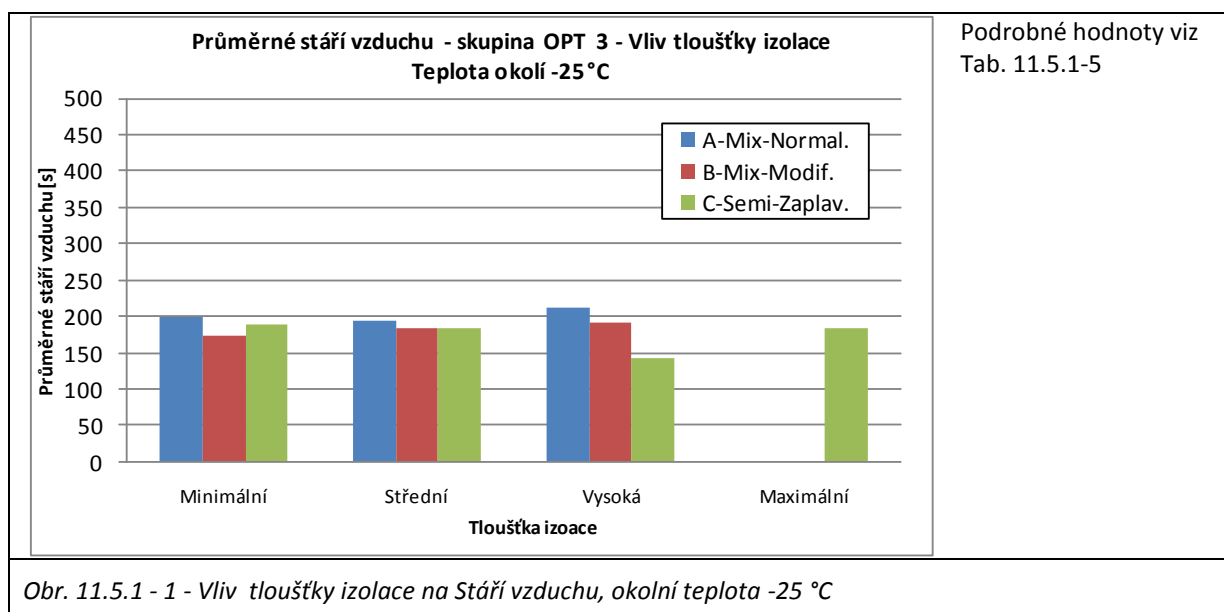
Tepelnou nepohodu na chodidlech a dolních končetinách lze pozorovat i pro modifikované a klasické směšovací větrání. Situace je ovšem rozdílná podle umístění sedačky: na figuríně R3 jsou chodidla v závislosti na tepelné izolaci v zóně 'příliš chladno' až 'chladno ale příjemně' u figuríny R5 se naopak nacházejí v zóně 'neutrálně' či 'teplo ale příjemně'. Opačné hodnocení pro různá sedadla je způsobeno vlivem primárních proudů z výustek, kdy na sedadle R3 nedopadá primární proud na chodidla, proto je hodnocení pocitu spíše v záporných hodnotách zatímco na sedadle R5 je proud směřován přímo na chodidla a způsobuje tak opačné hodnocení. Lze však vyvodit, že se zvyšující se izolací se extrémní hodnocení snižují a v případě kombinaci Vysoké izolace a modifikovaného směšovacího větrání jsou výrazně potlačeny. V důsledku nižší tepelné ztráty při vyšší izolaci kabiny lze totiž použít nižší pracovní rozdíl teplot pro udržení požadované teploty což má pozitivní dopad na lokální tepelnou pohodu a snížení extrémních tepelných pocitů v rozsahu od +1 do -1.

Tab. 11.5.1-2 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Typ okrajových podmínek	Figurína	R3			R5		
		CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
Minimální izolace	Mix-Normal	-2	0	N	-2	2	N
	Mix-Modif.	-2	1	N	-2	2	N
	Semizaplav.	-1	13	N	-1	6	N
Střední izolace	Mix-Normal	-2	2	N	-2	2	N
	Mix-Modif.	-2	1	N	-2	2	N
	Semizaplav.	-1	13	N	-1	9	N
Vysoká izolace	Mix-Normal	-1	5	N	-2	2	N
	Mix-Modif.	-1	6	N	-1	4	N
	Semizaplav.	0	14	N	-1	15	N
Maximální izolace	Semizaplav.	0	15	N	-1	8	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

Průměrné hodnoty indexu stáří vzduchu pro všechny modelové případy s okolní teplotou -25°C jsou uvedeny na obrázku 11.5.1-1. Je patrné, že síla tepelné izolace ovlivňuje kvalitu větrání především u Semizaplavovacího větrání, zatímco u obou směšovacích typů je kvalita větrání na izolaci relativně nezávislá. Vlivem vztlaku vzduchu dochází k jeho rychlému stoupání ke stropu kabiny, což má za následek dobré větrání v této oblasti, ale značně snižuje proudění vzduchu u podlahy. V tomto případě není silná výšková stratifikace vzduchu nežádoucí, ovšem v případě chlazení kabiny způsobuje tato základní vlastnost zaplavovacího principu větrání značné problémy (viz další popis a obrázek 11.5.1-2)



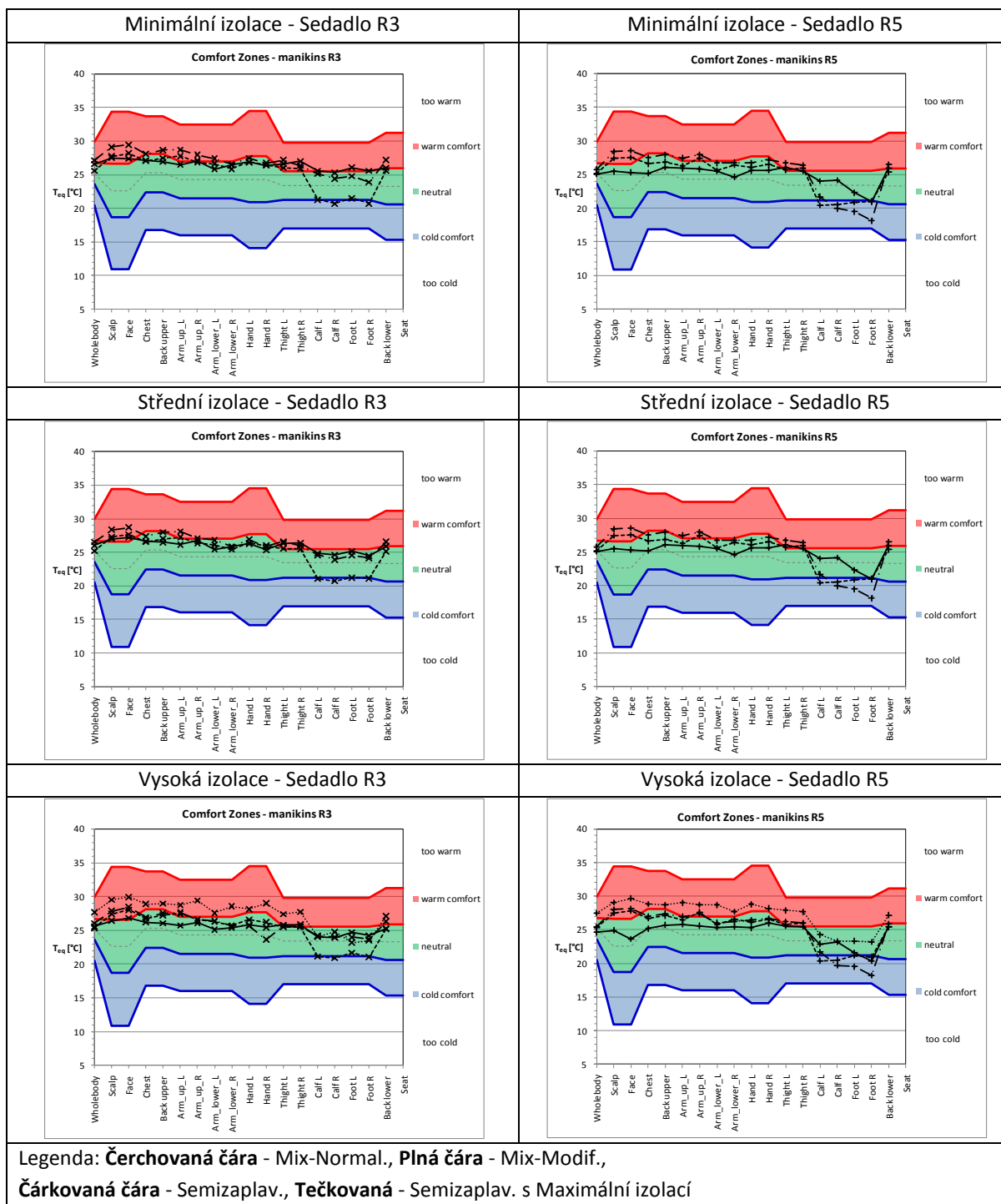
Porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů pro okolní teplotu $+35^{\circ}\text{C}$ (OPT3-A02, A04, B02, B04, C02, C04 a C08) a všechny typy skladeb tepelné izolace je uvedeno v diagramech komfortních zón (viz Tab. 11.5.1-3) a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu jsou vyčísleny v tabulce 11.5.1-4.

Z diagramů i tabulky vyplývá, že vliv tloušťky izolace na tepelnou pohodu při chlazení prostoru kabiny je podstatně menší nežli v případě vytápění. Ve všech modelových případech u Semizaplavovacího větrání se však projevuje vliv silné teplotní stratifikace, která způsobuje hromadění chladného větracího vzduchu u podlahy a tím dochází k zápornému hodnocení tepelných pocitů na chodidlech a lýtkách. U směšovacího větrání je negativního hodnocení tepelného pocitu na chodidlech dosaženo jen na sedadle R5, kde se jedná o vliv přímé expozice chodidle primárním proudem z výustky R5. Nejvyrovnanější bilanci celkového tepelného pocitu a tím pádem nejmenší závislost na tloušťce tepelné izolace vykazuje modifikované směšovací větrání a to díky rovnoměrnějšímu přívodu vzduchu do celého objemu kabiny. U tohoto typu větrání je největší počet částí těla v neutrální zóně a to pro všechny typy skladeb tepelné izolace.

Průměrné hodnoty indexu Stáří vzduchu pro všechny modelové případy s okolní teplotou $+35^{\circ}\text{C}$ jsou uvedeny na obrázku 11.5.1-2. Je patrné, že síla tepelné izolace ovlivňuje kvalitu větrání opět především u Semizaplavovacího větrání, zatímco u obou směšovacích typů je kvalita větrání na izolaci relativně nezávislá. Vlivem výrazné teplotní stratifikace

zůstává chladnější větrací vzduch v blízkosti podlahy a nestoupá ke stropu kabiny, což má za následek velice špatné větrání v této oblasti. Kvalita větrání navíc se stoupající tloušťkou tepelné izolace klesá, neboť silněji zateplené stěny generují méně stoupavých/klesaných proudů, které přispívají k rozrušení teplotní stratifikace.

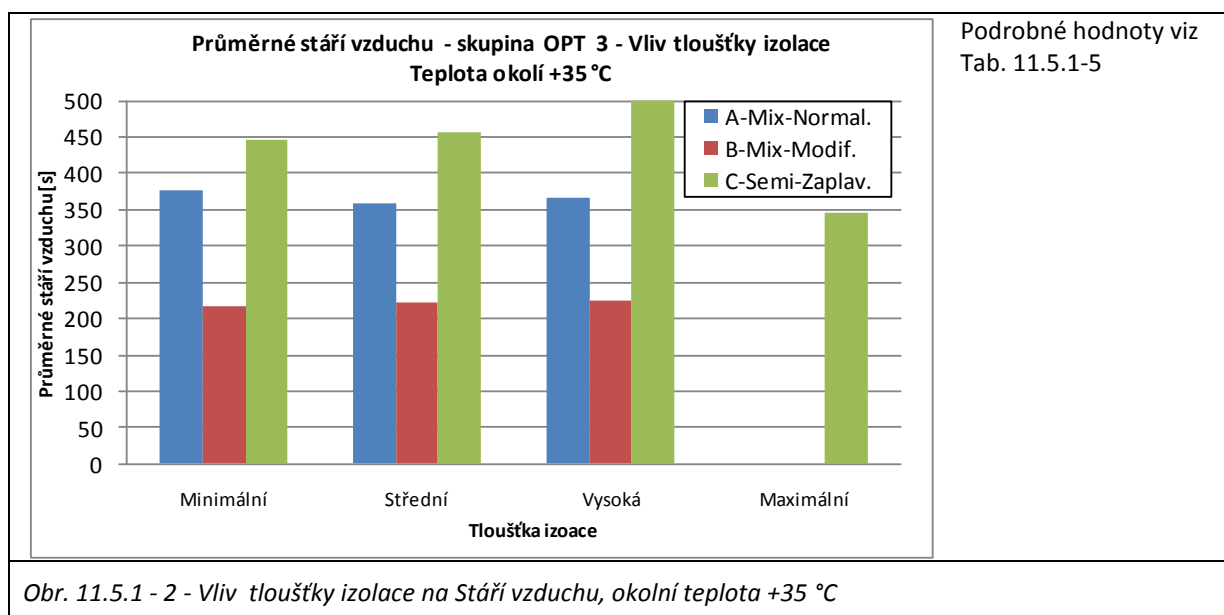
Tab. 11.5.1-3 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro různé tloušťky tepelné izolace a okolní teplotu +35 °C



Tab. 11.5.1-4 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Typ okrajových podmínek	Figurína	R3			R5		
		CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
Minimální izolace	Mix-Normal	+1	6	N	0	7	N
	Mix-Modif.	+1	10	N	0	14	N
	Semizaplav.	0	8	N	0	8	N
Střední izolace	Mix-Normal	0	9	N	0	7	N
	Mix-Modif.	0	13	N	0	15	N
	Semizaplav.	0	10	N	0	8	N
Vysoká izolace	Mix-Normal	0	11	N	0	8	N
	Mix-Modif.	0	12	N	0	16	N
	Semizaplav.	0	10	N	0	8	N
Maximální izolace	Semizaplav.	+1	4	N	+1	4	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?



Obr. 11.5.1 - 2 - Vliv tloušťky izolace na Stáří vzduchu, okolní teplota +35 °C

Tab. 11.5.1-5 - Průměrný index stáří vzduchu u jednotlivých figurín - skupina OPT3

Případ Figurína	Mix-norml				Mix-Modif				Semi-zaplavovací							
	A01	A02	A03	A04	B01	B02	B03	B04	C01	C02	C03	C04	C07	C08		
L1	231	296	232	279	162	184	173	221	212	350	226	379	238	394		
R1	225	371	207	351	180	184	183	206	216	379	225	394	243	404		
L2	213	327	204	303	177	245	188	254	203	420	177	500	208	304		
R2	207	351	195	338	177	220	185	223	198	469	181	459	196	346		
L3	174	338	181	356	186	237	192	249	158	383	156	368	161	381		
R3	182	461	187	386	165	216	193	209	176	422	119	346	104	290		
L4	185	342	177	424	161	205	187	213	185	520	186	523	176	291		
R4	177	463	181	444	162	233	172	239	176	538	173	583	145	346		
R5	208	441	192	354	182	223	180	184	183	538	219	559	184	364		
průměr	200	377	195	360	172	216	184	222	190	447	185	457	184	347		

Legenda : číselné hodnoty v tabulce jsou rovny indexu stáří vzduchu [s] ve výšce hlavy 110 cm na podlahou

11.5.2 Závěrečné shrnutí vyhodnocení výsledků skupiny OPT 3

V optimalizační skupině OPT3 byl prozkoumán vlivy tloušťky tepelné izolace na distribuci vzduchu a tepelnou pohodu v kabině. Na základě zjištění ze simulací lze v souhrnu konstatovat.

- V případě vytápění kabiny má tloušťka tepelné izolace nejmenší vliv při využití Semizaplavovacího větrání. Problematické jsou ovšem části těla chodila a dolní končetiny nacházející se v blízkosti podlahy, protože větrací vzduch v důsledku vyššího vztlaču a nízké počáteční hybnosti rychle stoupá ke stropu kabiny a nevytápí tak prostor u podlahy. Problém je řešitelný zvýšením tepelné izolace podlahy, což bylo ukázáno na grafech v tabulce 11.5.1-1 - Maximální izolace. U směšovacího a modifikovaného směšovacího větrání lze jako hlavní závěr vyvodit, že se zvyšující se tepelnou izolací se zlepšují lokální tepelné pocity a nejlepšího hodnocení bylo dosaženo v kombinaci Vysoké izolace a Modifikovaného směšovacího větrání. V důsledku nižší tepelné ztráty při vyšší izolaci kabiny lze totiž použít nižší pracovní rozdíl teplot pro udržení požadované teploty, což má pozitivní dopad na lokální tepelnou pohodu a zúžení rozsahu tepelných pocitů do pásma od +1 do -1.
- V případě chlazení kabiny má tloušťka tepelné izolace podstatně menší vliv na tepelnou pohodu v kabině než při vytápění. Ve všech modelových případech u Semizaplavovacího větrání se však projevuje vliv silné teplotní stratifikace, která způsobuje hromadění chladného větracího vzduchu u podlahy a tím dochází k zápornému hodnocení tepelných pocitů na chodidlech a lýtkách. U směšovacího větrání je negativního hodnocení tepelného pocitu na chodidlech dosaženo jen na sedadle R5, kde se jedná o vliv přímé expozice chodidel primárním proudem z výstky R5. Nejvyrovnanější bilanci celkového tepelného pocitu a tím pádem nejmenší závislost na tloušťce tepelné izolaci vykazuje Modifikované směšovací větrání a to díky rovnoměrnějšímu přívodu vzduchu do celého objemu kabiny.
- Průměrné hodnoty indexu stárí vzduchu pro všechny modelové případy s okolní teplotou -25 a +35 °C jsou uvedeny na obrázku 11.5.1-1 a 11.5.1-2. Je patrné, že síla tepelné izolace ovlivňuje kvalitu větrání především u Semizaplavovacího větrání, zatímco u obou směšovacích typů je kvalita větrání na izolaci relativně nezávislá.

Experimenty v optimalizační skupině OPT3 shodně z výsledky skupiny OPT2 naznačily jak vyrovnanou výkonnost systému Modifikovaného směšovacího větrání pro různé tloušťky tepelné izolace, tak odhalily silnou závislost kvality větrání u Semizaplavovacího větrání na okolní teplotě. Semizaplavovací větrání poskytuje při vytápěcím režimu dostatečné větrání v úrovni hlavy, ale podává velice špatné výsledky při intenzivním chlazení, kdy se větrací vzduch v důsledku stabilní teplotní stratifikace hromadí u podlahy a není distribuován do dýchacích zón jednotlivých cestujících. Tento hendikep prakticky vylučuje využití tohoto typu větrání pro kabiny malých dopravních letadel, protože chladicí režim je běžným provozním režimem při pozemním provozu letadla v letních měsících.

11.6 Optimalizace vlastností interiéru - emisivita povrchů

Kapitola je zaměřena na posouzení vlivu emisivity vnitřních povrchů stěn a stropu kabiny na vnitřní mikroklima a tepelnou pohodu. Na základě výsledků simulací z hlavní skupiny OPT1 byly vybrány pro posouzení vlivu tři základní sady emisivity povrchů označených jako Minimální, Střední a Vysoká skladba. Pro modelové případy A01 až A04, B01 až B04 a C01 až C04 byla nastaveny parametry prostupu tepla pro interiérové panely odpovídající Vysoké tepelné izolaci stěn. Pro modelové případy A05, A06, B05, B06, C05 a C06 byly nastaveny parametry odpovídající Minimální tepelné izolaci stěn. Předpokladem bylo, že při malé tloušťce izolace by nízká emisivita mohla měřitelně snížit přenos tepla mezi lidským tělem a vnitřními povrchy kabiny a zvýšit tak celkovou tepelnou pohodu. Všechny modelové případy definované pro skupinu OPT4 včetně nastavení hlavních okrajových podmínek uvádí tabulka 11.6-1

Tab. 11.6-1 - Podskupiny skupiny OPT 3 - Nastavení okrajových podmínek

Podskupina	Případ	Teplota okolí [°C]	Teplota větracího vzduchu [°C]	Rychlost vstup pravý/levý [m/s]	Objem. tok [l/s]	Hmot. tok [kg/s]
A-Mix-Normal	A01	-25 °C	47,4	10,41/8,18	66,5	0,0708
	A02	+35 °C	16,4	10,41/8,18	66,5	0,0784
	A03	-25 °C	47,4	10,41/8,18	66,5	0,0708
	A04	+35 °C	16,4	10,41/8,18	66,5	0,0784
	A05	-25 °C	60,2	10,41/8,18	66,5	0,0681
	A06	+35 °C	13,0	10,41/8,18	66,5	0,0793
B-Mix-Modif	B01	-25 °C	47,4	10,41/8,18	66,5	0,0708
	B02	+35 °C	16,4	10,41/8,18	66,5	0,0784
	B03	-25 °C	47,4	10,41/8,18	66,5	0,0708
	B04	+35 °C	16,4	10,41/8,18	66,5	0,0784
	B05	-25 °C	60,2	10,41/8,18	66,5	0,0681
	B06	+35 °C	13,0	10,41/8,18	66,5	0,0793
C-Velkoplošná	C01	-25 °C	51,0	0,042	66,5	0,0708
	C02	+35 °C	15,7	0,042	66,5	0,0784
	C03	-25 °C	51,0	0,042	66,5	0,0708
	C04	+35 °C	15,7	0,042	66,5	0,0784
	C05	-25 °C	60,0	0,042	66,5	0,0681
	C06	+35 °C	14,2	0,042	66,5	0,0790

V tabulce 11.6-2 jsou uvedeny emisivity povrchů jednotlivých konstrukcí pro všechny tři hlavní skupiny označené jako Nízká, Střední a Vysoká emisivita. Hodnoty skladby tepelné izolace byly shodné s materiálovým složením standardního (Vysokého) zateplení (viz Tab. 11.2-1)) nebo Minimálního zateplení pro případy A05, A06, B05, B06, C05 a C06.

Tab. 11.6-2 - Parametry emisivit povrchů interiérových panelů

Poz.	Část	Plocha [m ²]	Sada emisivit		
			Nízká	Střední	Vysoká
K-1	Kokpit podlaha (celkem)	1,807	0,90	0,90	0,90
K-2	Kokpit stěny	3,892	0,20	0,60	0,90
K-3	Kokpit přepážka	2,221	0,20	0,60	0,90
K-4	Kokpit strop	1,548	0,20	0,60	0,90
C-1	Kabina podlaha	6,905	0,90	0,90	0,90
C-2	Kabina stěny horní	8,520	0,20	0,60	0,90
C-3	Kabina stěny pod vzduch.	1,522	0,20	0,60	0,90
C-4	Kabina strop	5,829	0,20	0,60	0,90
C-5	Kabina kryty vzduch.	dle	0,20	0,60	0,90
C-6	Kabina dveře	1,698	0,20	0,60	0,90
Z-1	Zavazadl. prost. podlaha	1,780	0,90	0,90	0,90
Z-2	Zavazadl. prost. stěny	2,533	0,20	0,60	0,90
Z-3	Zavazadl. prost. přepážka	1,255	0,20	0,60	0,90
Z-4	Zavazadl. prost. strop	1,207	0,20	0,60	0,90

- Celkový objem kabiny: 14,99 m³

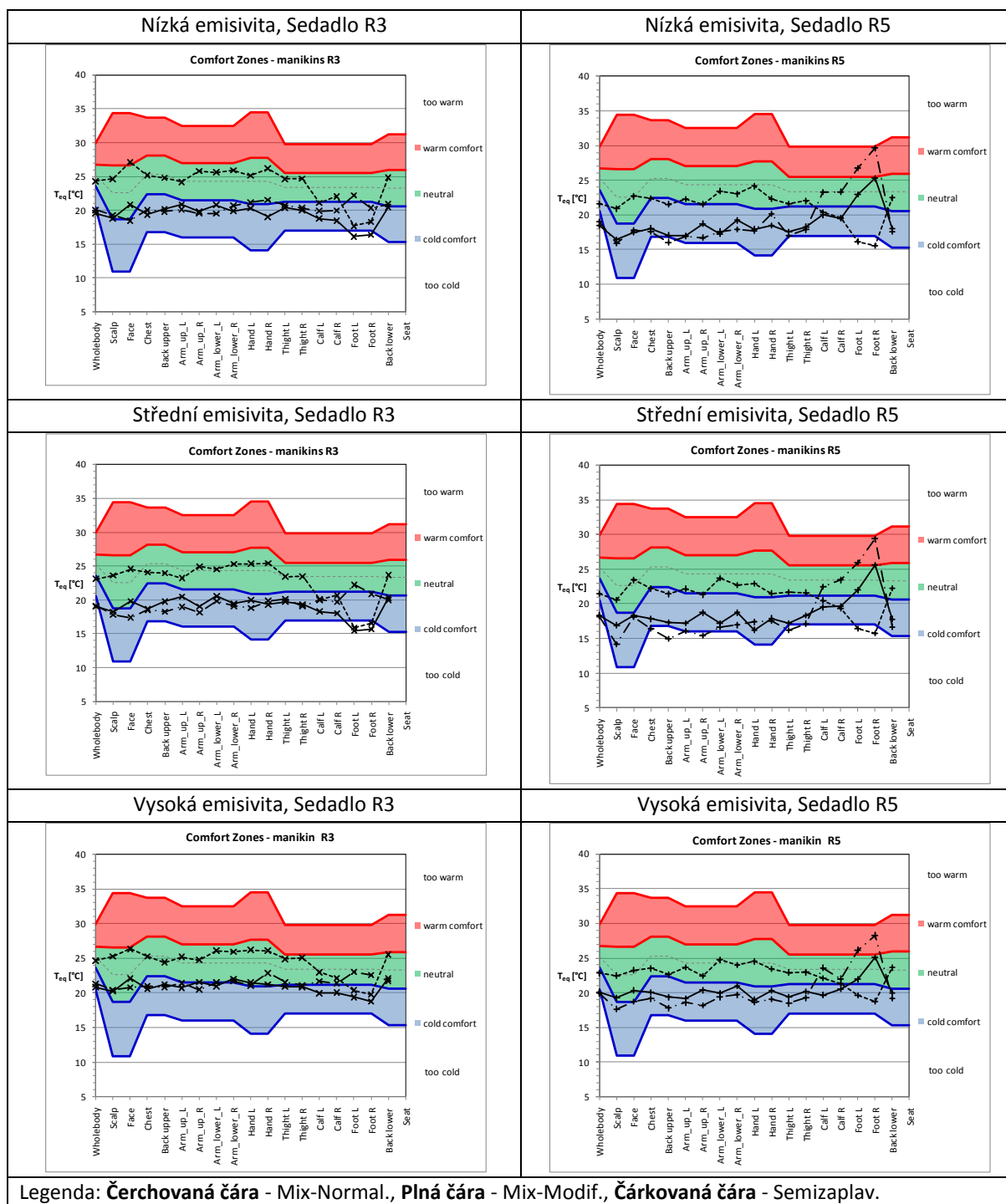
11.6.1 Vyhodnocení výsledků skupiny OPT 4

Porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů pro okolní teplotu -25°C (OPT4-A01, A03, B01, B03, C01, C03 a OPT1-A01, B01 a C01), vysokou skladbu tepelné izolace a všechny typy distribuce vzduchu a sady emisivit je uvedeno v diagramech komfortních zón (viz Tab. 11.6.1-1) a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu jsou vyčísleny v tabulce 11.6.1-2.

Z diagramů i tabulky lze vyvodit, že u všech typů distribuce vzduchu je patrný vliv změny vlastností emisivit vnitřních povrchů na tepelnou pohodu. Relativně nejlepšího skóre, v případě lokálních tepelných pocitů, dosahuje modelový případ s vysokou emisivitou, následovaný případem se střední emisivitou a nejméně částí v neutrální zóně má případ se střední emisivitou povrchů. Při započtení celkového tepelného pocitu je pak z pohledu vytváření nejpříjemnějšího tepelného mikroklimatu nejlepší kabina s vysokou emisivitou vnitřních povrchů a to pro všechny typy distribuce vzduchu. Ačkoliv bylo pro všechny modelové případy nastaveno stejné množství větracího vzduchu o stejné teplotě a vnitřní teplota vzduchu v kabině, je u všech případů prakticky stejná, vysvětlení lze nalézt v principech přenosu tepla radiací mezi figurínami a okolními stěnami. Celkový tepelný tok radiací mezi jednotlivými povrchy i mezi povrchy a figurínami je obousměrnou výměnou záviselý na emisivitě, rozdílu teplot a uhlových faktorech. Změna emisivity jedné části interiéru, tak může vyvolat změny nejen na této konkrétní části, ale i na částech jiných, s kterými si vyměňuje teplo radiací. Takže při snížení emisivity stropu, může klesnout celkový tepelný tok dodávaný radiací do stropu z ostatních částí kabiny, čímž poklesne jeho teplota. Tato skutečnost je dokumentována a obrázcích 11.6.1-2 až 11.6.1-4. Pokud je však emisivita dostatečně nízká (např. 0,2) negativní vliv nížené teploty není natolik zásadní, jako v případě stření emisivity (např. 0,6), kdy je sice snížení teploty stropu nižší, ale vlivem třikrát vyšší emisivity je negativní dopad na tepelnou pohodu výraznější.

Průměrné hodnoty indexu stáří vzduchu pro všechny modelové případy s okolní teplotou $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$ jsou uvedeny na obrázku 11.6.1-1. Emisivita interiérových panelů ovlivňuje kvalitu větrání především u Semizaplavovacího větrání, zatímco u obou směšovacích typů je kvalita větrání na emisivitě povrchů nezávislá. Zdůvodnění závislosti Semizaplavovacího větrání na emisivitě lze spatřovat ve vlivu změn výměny tepla na částech stropu a stěny neboť stěny s nízkou emisivitou mají v důsledku sníženého přenosu tepla radiací z podlahy nižší teplotu, snižují teplotní stratifikaci a zužují zónu čerstvého vzduchu u stropu kabiny.

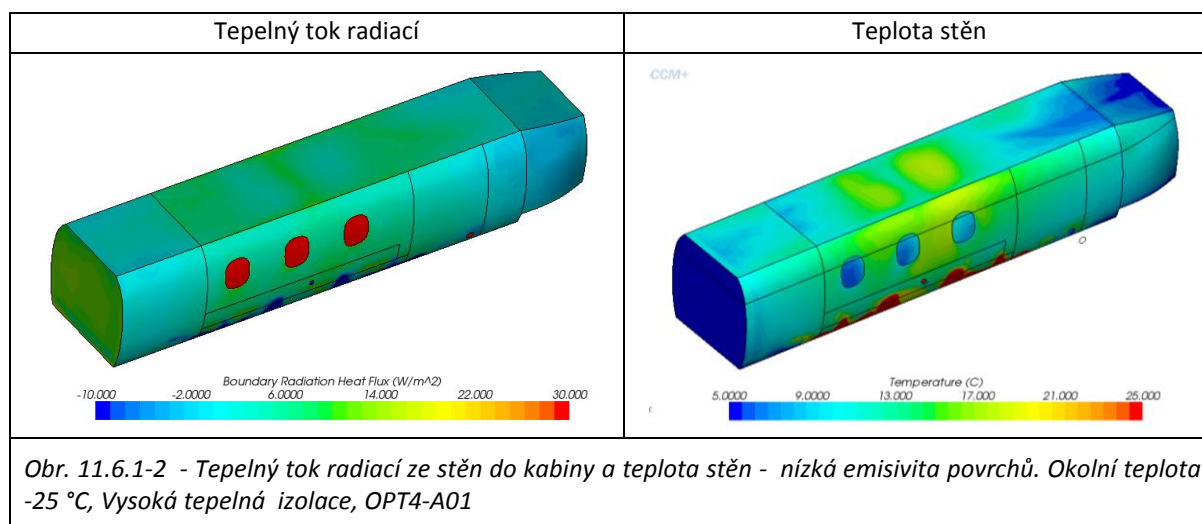
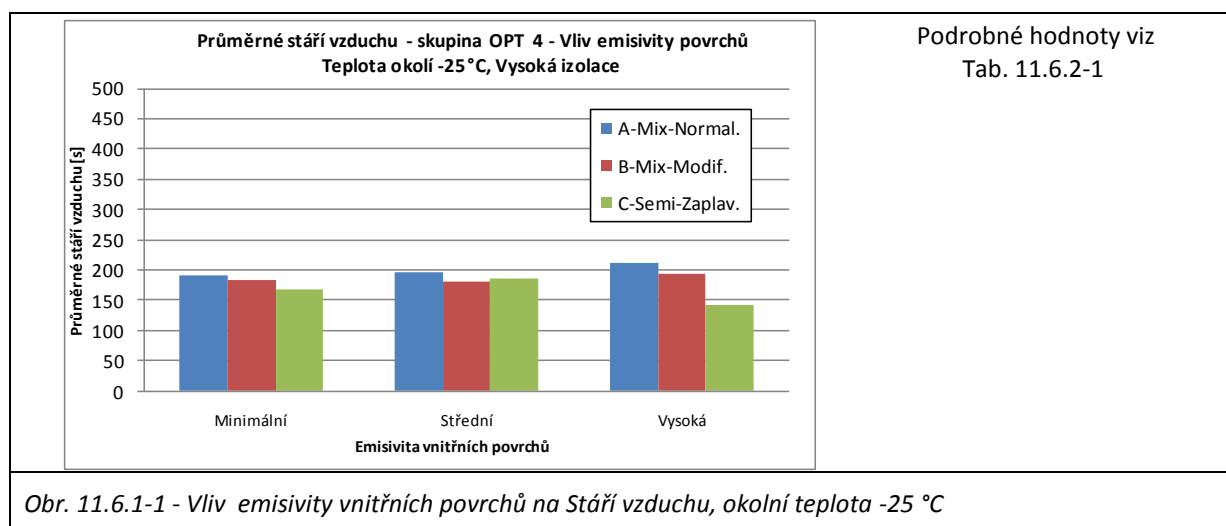
Tab. 11.6.1-1 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro různé emisivity vnitřních povrchů, okolní teplotu $-25\text{ }^{\circ}\text{C}$, vysoká izolace

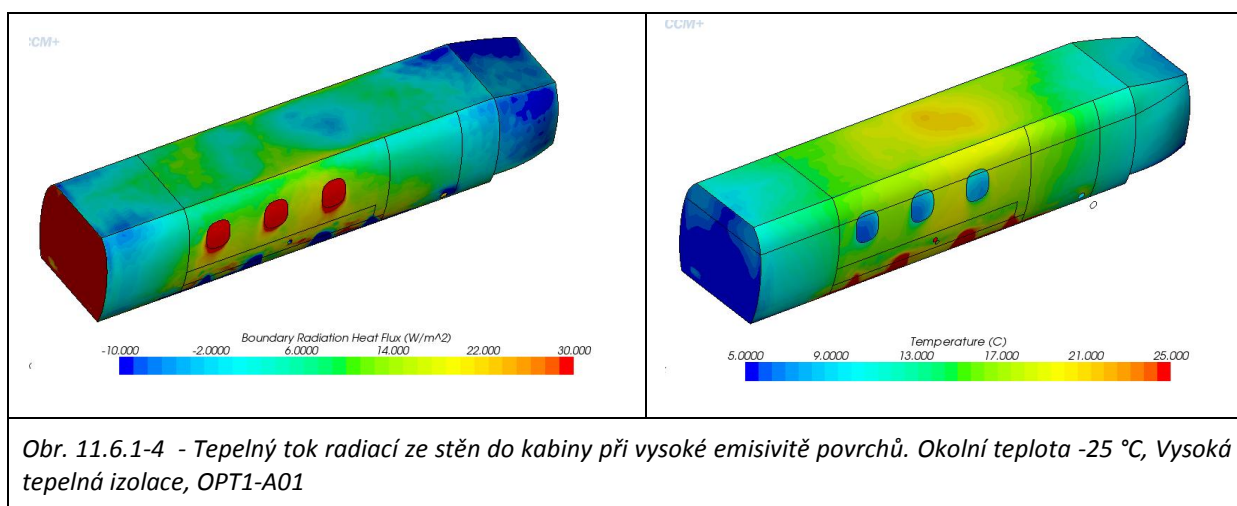
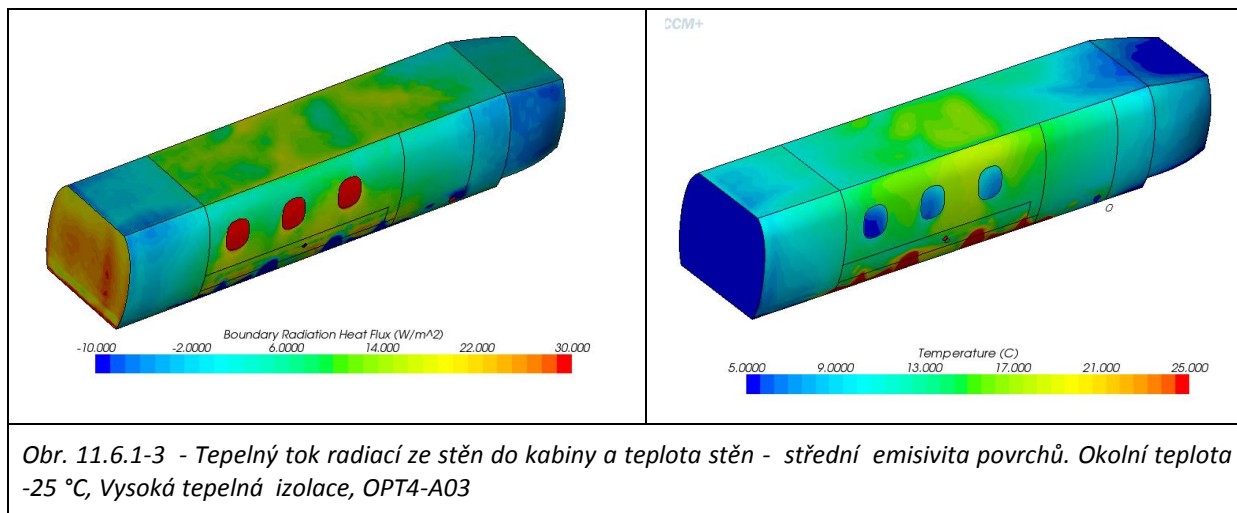


Tab. 11.6.1-2 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Typ okrajových podmínek	Figurína	R3			R5		
		CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
Nízká emisivita	Mix-Normal	-2	5	N	-2	2	N
	Mix-Modif.	-2	2	N	-2	2	N
	Semizaplav.	0	13	N	-1	12	N
Střední emisivita	Mix-Normal	-2	1	N	-2	2	N
	Mix-Modif.	-2	1	N	-2	2	N
	Semizaplav.	-1	13	N	-1	10	N
Vysoká emisivita	Mix-Normal	-1	10	N	-2	2	N
	Mix-Modif.	-1	8	N	-1	4	N
	Semizaplav.	0	14	N	-1	14	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?





Porovnání výsledků tepelné pohody získaných z modelových případů pro okolní teplotu +35°C (OPT4-A02, A04, B02, B04, C02 a C04 a OPT1-A03, B03 a C03), vysokou skladbu tepelné izolace, všechny typy distribuce vzduchu a sady emisivit, je uvedeno v diagramech komfortních zón (viz Tab. 11.6.1-4) a dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu jsou vyčísleny v tabulce 11.6.1-3.

Z diagramů i tabulky vyplývá, že vliv emisivity vnitřních povrchů na tepelnou pohodu při chlazení prostoru kabiny je menší než při vytápění. Ve všech modelových případech u Semizaplavovacího větrání se však projevuje vliv silné teplotní stratifikace, která způsobuje hromadění chladného větracího vzduchu u podlahy a tím dochází k zápornému hodnocení tepelných pocitů na chodidlech a lýtkách. U směšovacího větrání je negativního hodnocení tepelného pocitu na chodidlech dosaženo jen na sedadle R5, kde se jedná o vliv přímé expozice chodidel vůči primárnímu proudu z výustky R5. Nejvyrovnanější bilanci celkového tepelného pocitu a tím pádem nejmenší závislost na emisivitě vnitřních povrchů vykazuje Modifikované směšovací větrání a to díky rovnoměrnějšímu přívodu vzduchu do celého objemu kabiny. U tohoto typu větrání je největší počet částí těla v neutrální zóně a to pro všechny testované hodnoty emisivit.

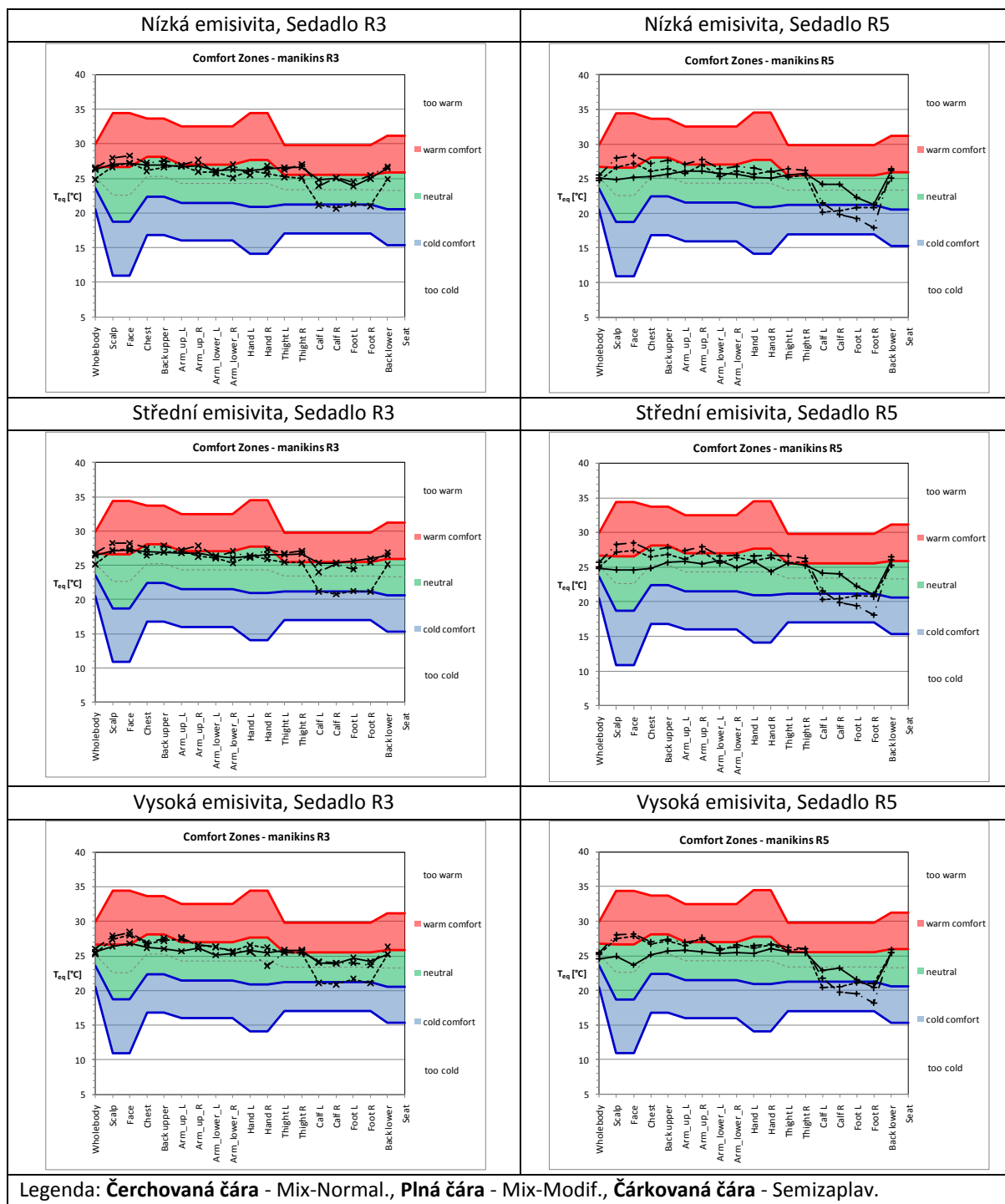
Průměrné hodnoty indexu Stáří vzduchu pro všechny modelové případy s okolní teplotou +35 °C jsou uvedeny na obrázku 11.6.1-5. Vliv emisivity na kvalitu větrání je při vytápění velice malý a pozorovatelný rozdíl je pouze opět u Semizaplavovacího větrání, zatímco u obou směšovacích typů je kvalita větrání na emisivitě vnitřních povrchů prakticky nezávislá.

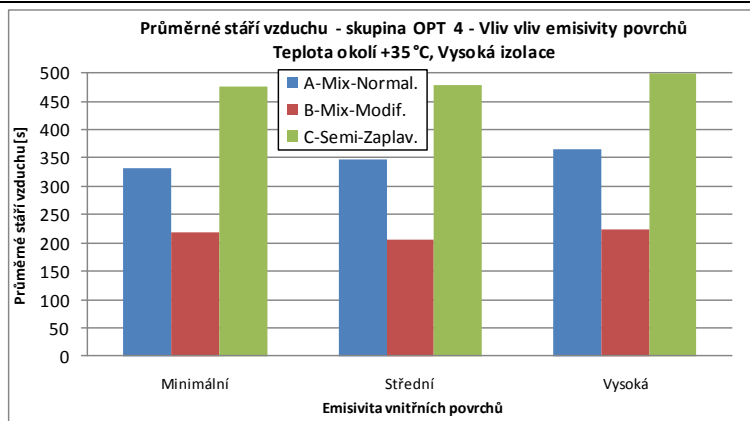
Tab. 11.6.1-3 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Typ okrajových podmínek	Figurína	R3			R5		
		CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
Nízká emisivita	Mix-Normal	0	11	N	0	9	N
	Mix-Modif.	0	12	N	0	16	N
	Semizaplav.	0	11	N	0	11	N
Střední emisivita	Mix-Normal	0	11	N	0	8	N
	Mix-Modif.	0	11	N	0	16	N
	Semizaplav.	0	11	N	0	10	N
Vysoká emisivita	Mix-Normal	0	12	N	0	11	N
	Mix-Modif.	0	15	N	0	16	N
	Semizaplav.	0	10	N	0	9	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

Tab. 11.6.1-4 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro různé emisivity vnitřních povrchů, okolní teplotu 35 °C, vysoká izolace





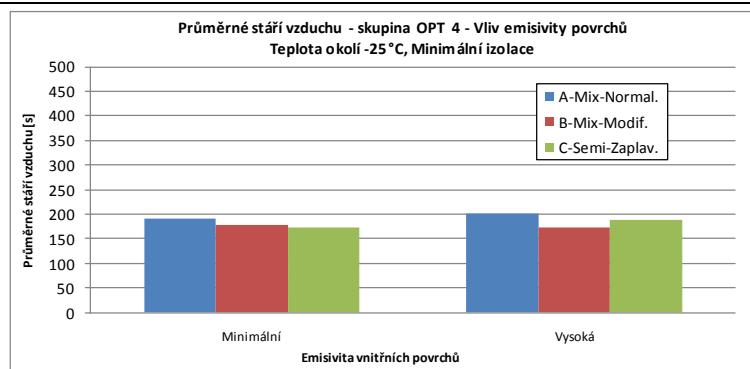
Podrobné hodnoty viz Tab. 11.6.2-1

Obr. 11.6.1-5 - Vliv emisivity vnitřních povrchů na Stáří vzduchu, okolní teplota +35 °C

Další porovnání výsledků tepelné pohody pro modelové případy (OPT4-A05, B05, a C05 a OPT3-A01, B01 a C01), s okolní teplotou -25 °C, Minimální skladbu tepelné izolace, všemi typy distribuce vzduchu a sadami emisivit Nízká a Vysoká je uvedeno v diagramech komfortních zón (viz Tab. 11.6.1-5). Dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu jsou vyčísleny v tabulce 11.6.1-6.

Z diagramů i tabulky vyplývá, že vliv emisivity vnitřních povrchů na tepelnou pohodu při vytápění a minimální tepelné izolaci stěn kabiny je relativně velice malý. Na diagramech i v tabulce 11.6.1-6 lze pozorovat jen malé změny v tepelných pocitech na jednotlivých částech těla. Rozdíly se projevují především u Semizaplavovacího větrání, čímž se opět potvrzuje již dříve pozorovaná závislost výkonnosti toho typu distribuce na okolních podmínkách. Nejvyrovnanější bilanci celkového tepelného pocitu a tím pádem nejmenší závislost na emisivitě vnitřních povrchů vykazuje modifikované směšovací větrání.

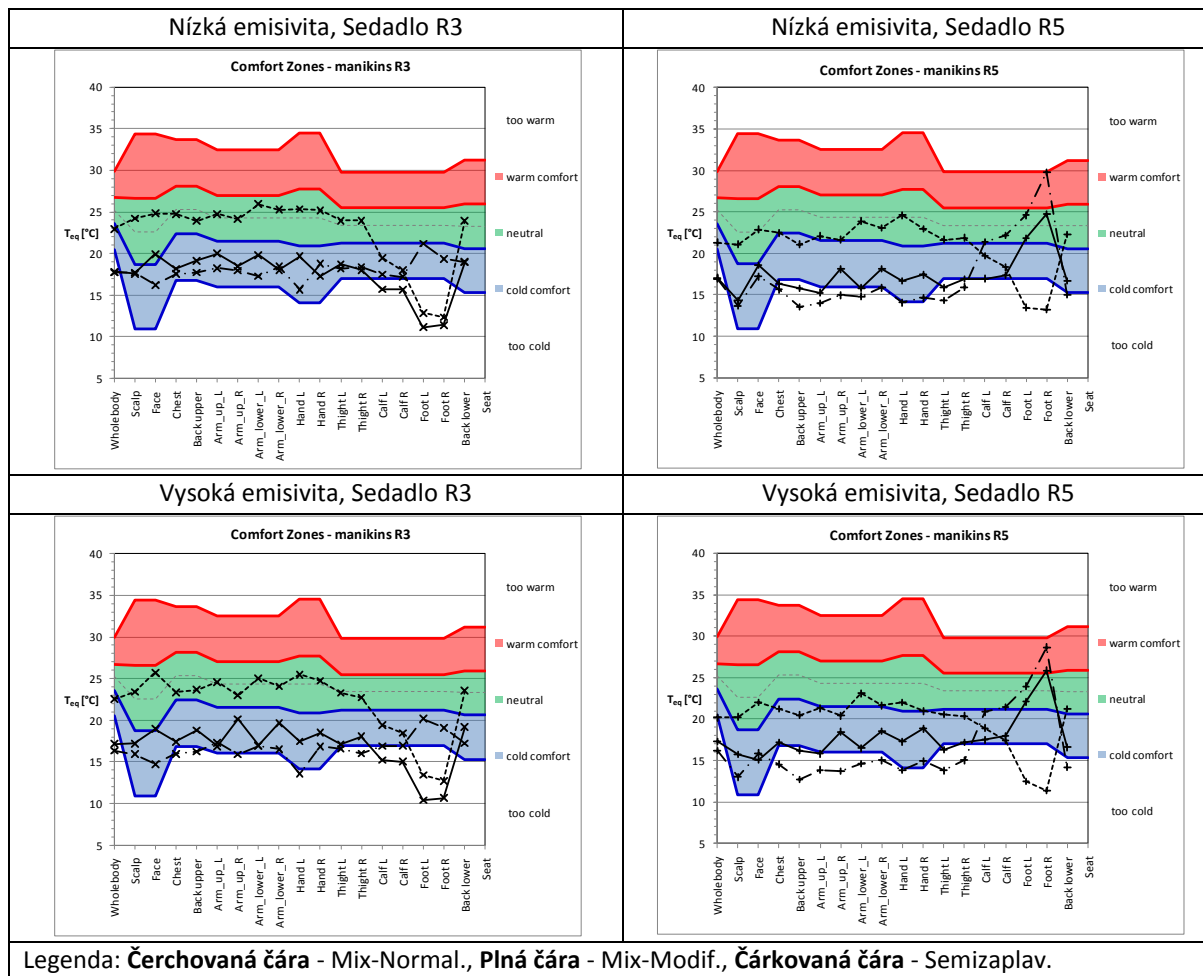
Průměrné hodnoty indexu stáří vzduchu pro všechny modelové případy s okolní teplotou -25 °C jsou uvedeny na obrázku 11.6.1-6. Je patrné, že vliv emisivity na kvalitu větrání je při vytápění kabiny prakticky zanedbatelný a mezi případy s nízkou a vysokou emisivitou se nevyskytují větší rozdíly.



Podrobné hodnoty viz Tab. 11.6.2-1

Obr. 11.6.1-6 - Vliv emisivity vnitřních povrchů na Stáří vzduchu, okolní teplota -25 °C, minimální izolace

Tab. 11.6.1-5 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro různé emisivity vnitřních povrchů, okolní teplotu -25 °C, minimální izolace



Tab. 11.6.1-6 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

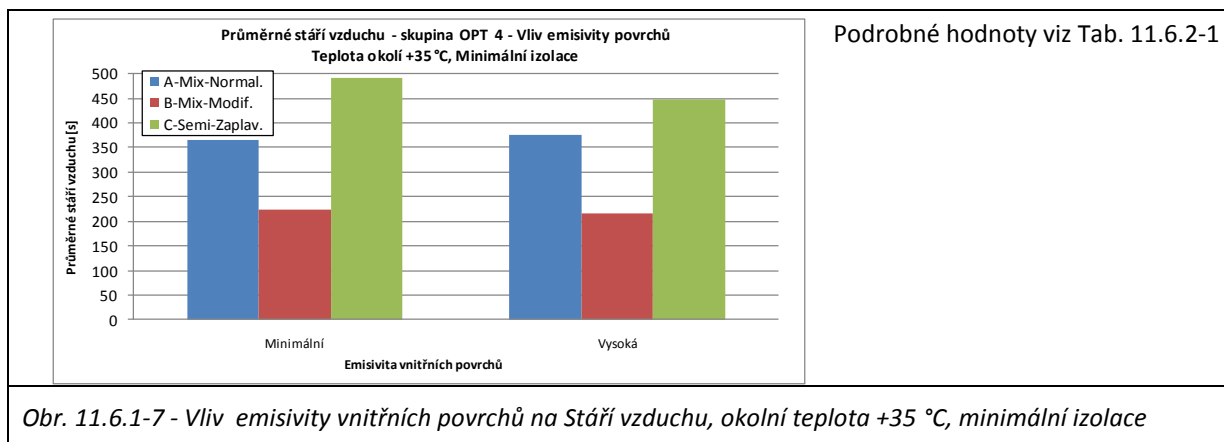
Typ okrajových podmínek	Figurína	R3			R5		
		CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
Min. emisivita	Mix-Normal	-2	0	N	-2	2	N
	Mix-Modif.	-2	1	N	-2	2	N
	Semizaplav.	-1	13	N	-1	6	N
Vysoká emisivita	Mix-Normal	-2	0	N	-2	2	N
	Mix-Modif.	-2	1	N	-2	2	N
	Semizaplav.	-1	13	N	-1	6	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

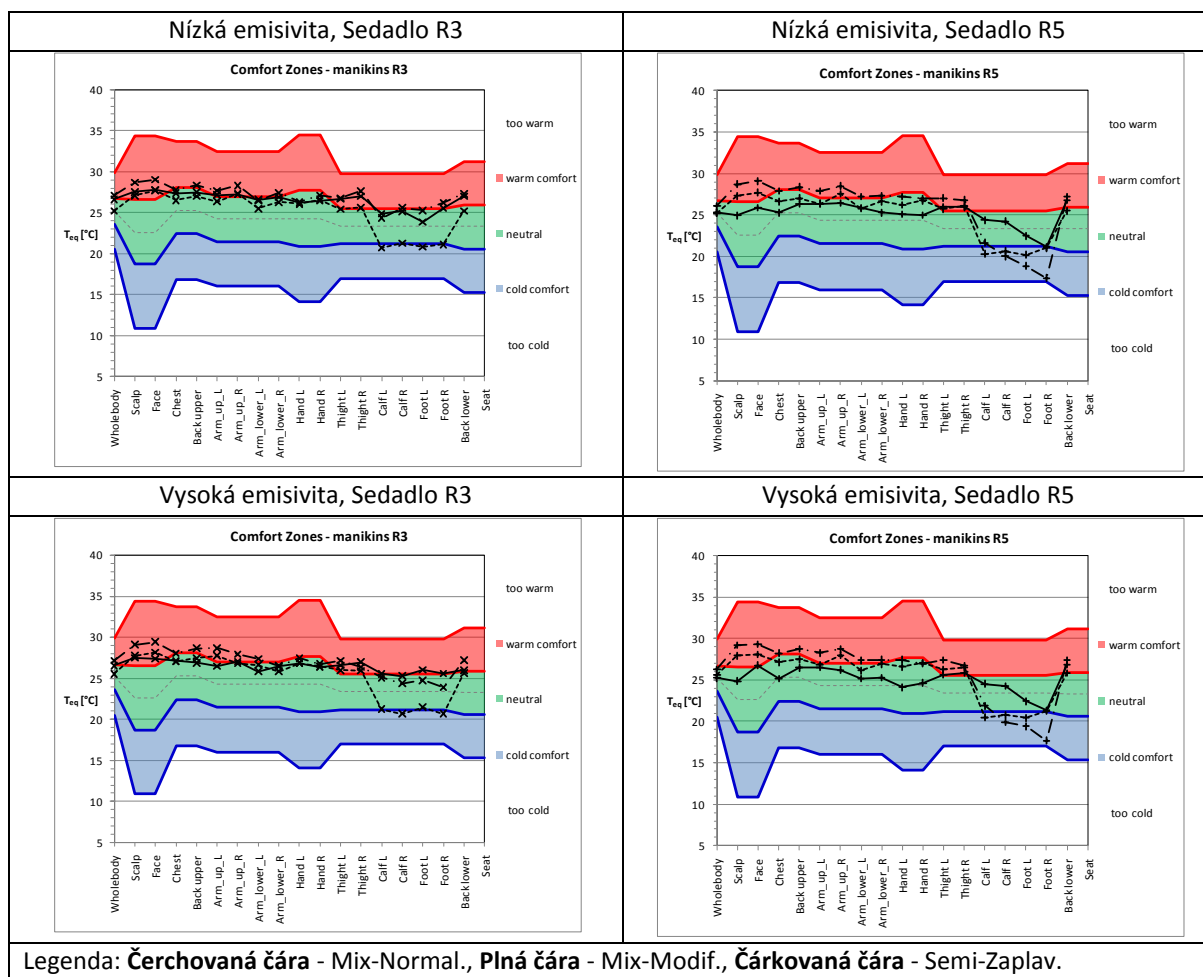
Posledním porovnání v celé práci je porovnání výsledků tepelné pohody pro modelové případy (OPT4-A06, B06, a C06 a OPT3-A02, B02 a C02), s okolní teplotou + 35 °C, Minimální skladbou tepelné izolace, všemi typy distribuce vzduchu a sadami emisivit Nízká a Vysoká, které je uvedeno v diagramech komfortních zón (viz Tab. 11.6.1-7). Dílčí charakteristiky tepelného mikroklimatu jsou vyčísleny v tabulce 11.6.1-8.

Z diagramů i tabulky vyplývá, že vliv emisivity vnitřních povrchů na ekvivalentní teplotu jednotlivých částí těla při chlazení prostoru kabiny a minimální skladbě tepelné izolace je malý, ale z důvodu velikosti lokálních ekvivalentních teplot, které se nacházejí velice blízko přechodu mezi zónami +1 a 0, lze při změnách emisivity pozorovat protichůdné změny u všech typů distribuce vzduchu. Změny jsou však natolik malé a nesystematické, že nelze učinit jednoznačný závěr o vlivu emisivity na tepelnou pohodu v kabině. Lze opět jen konstatovat, že nejvyrovnanějšího výkonu dosáhlo Modifikované směšovací větrání, při kterém je i nejvíce částí těla v neutrální zóně.

Průměrné hodnoty indexu stáří vzduchu pro všechny modelové případy s okolní teplotou + 35 °C jsou uvedeny na obrázku 11.6.1-7. Je patrné, že vliv emisivity na kvalitu větrání je při chlazení velice malý a pozorovatelný rozdíl je pouze opět pouze u Semizaplavovacího větrání, zatímco u obou směšovacích typů je kvalita větrání na emisivitě vnitřních povrchů prakticky nezávislá i v případě minimální skladby tepelné izolace.



Tab. 11.6.1-7 - Vzájemné porovnání diagramů komfortních zón pro různé emisivity vnitřních povrchů, okolní teplotu +35 °C, minimální izolace



Tab. 11.6.1-8 - Tepelný pocit pro celé tělo, počet částí v neutrální zóně a celkový komfort

Typ okrajových podmínek	Figurína	L1			R5		
		CTZ	ČNZ	Ko	CTZ	ČNZ	Ko
Min. emisivita	Mix-Normal	+1	7	N	0	4	N
	Mix-Modif.	+1	12	N	0	13	N
	Semizaplav.	0	9	N	0	8	N
Vysoká emisivita	Mix-Normal	+1	7	N	0	7	N
	Mix-Modif.	+1	11	N	0	14	N
	Semizaplav.	0	9	N	0	8	N

Legenda zkratk: CTZ - tepelný pocit pro celé tělo (od -2 do +2), ČNZ - celkový počet částí v neutrální zóně (0 až 17), Ko - dosaženo celkového tepelného komfortu (A/N)?

11.6.2 Závěrečné shrnutí vyhodnocení výsledků skupiny OPT 4

V optimalizační skupině OPT4 byl prozkoumán vliv emisivity vnitřních povrchů na tepelnou pohodu v kabině při všech uvažovaných druzích distribuce vzduchu. Na základě zjištění ze simulací lze v souhrnu konstatovat.

- V modelových případech s Vysokou tepelnou izolací bylo pro všechny typy distribuce vzduchu nejlepšího hodnocení tepelného stavu prostředí dosaženo u Vysoké emisivity povrchů, přičemž autor při plánování této optimalizační skupiny očekával opak. Vysvětlení tedy musíme hledat v principu přenosu tepla radiací mezi figurínami a okolními stěnami, protože pro všechny modelové případy byl jinak nastaven stejný objemový průtok větracího vzduchu o stejné teplotě a vnitřní teplota vzduchu v kabině byla u všech případů prakticky stejná. Celkový tepelný tok radiací mezi jednotlivými povrchy i mezi povrchy a figurínami je obousměrnou výměnou záviselá na emisivitě, rozdílu teplot a uhlových faktorech. Změna emisivity jedné části interiéru, tak může vyvolat změny nejen na této konkrétní části, ale i na částech jiných, s kterými si vyměňuje teplo radiací. Pak například při snížení emisivity stropu, může klesnout celkový tepelný tok dodávaný radiací do stropu z ostatních částí kabiny, čímž poklesne jeho teplota. Tato skutečnost je dokumentována a obrázcích 11.6.1-2 až 11.6.1-4. Pokud je však emisivita dostatečně nízká (např. 0,2) negativní vliv nížené teploty není natolik zásadní, jako v případě stření emisivity (např. 0,6), kdy je sice snížení teploty stropu nižší, ale vlivem třikrát vyšší emisivity je negativní dopad na tepelnou pohodu výraznější.
- V modelových případech s Minimální tepelnou izolací jsou pro všechny typy distribuce vzduchu rozdíly mezi nízkou a vysokou emisivitou velice nízké a vysvětlení lze hledat ve stejných mechanismech, jaké byly popsány výše.
- Výsledky pro chlazení kabiny jsou velice podobné jako u optimalizační skupiny OPT3 - vliv tloušťky zateplení. Především se opakovaně ve všech případech vyskytoval problém s nízkou ekvivalentní teplotou u dolních končetin při využití Semizaplavovacího větrání. Tento problém však nelze řešit změnou emisivity okolních povrchů, neboť má na tepelnou pohodu při zaplavovacím větrání jen minimální vliv.

Z modelových případů v optimalizační skupině OPT4 lze vyvodit závěr, že emisivita vnitřních povrchů má jen velice malý dopad na výslednou tepelnou pohodu v kabině. Ať už je emisivita povrchů nízká, nebo vysoká, na základě principu přenosu tepla radiací a celkové tepelné bilance povrchů nedochází při snižování emisivity vnitřních povrchů k žádoucím změnám směrem k vyšší tepelné pohodě. Navíc s ohledem na technické a materiálové řešení případných úprav vnitřních povrchů je reálné pouze vytváření nízkých emisivit. Takové úpravy jsou však problematické z hlediska designu, neboť se většinou jedná o kovové materiály, což posléze vede ke kovovému odlesku takových povrchů. Závěrečným konstatováním kapitoly 11.6 je tedy výsledek - změnou emisivity vnitřních povrchů lze jen obtížně dosáhnout zlepšení tepelné pohody v kabině letadla.

Tab. 11.6.2-1 - Kvalita větrání, index stáří vzduchu - skupina OPT4

Případ Figur.	Mix-Normal						Mix-Modif					
	A01	A02	A03	A04	A05	A06	B01	B02	B03	B04	B05	B06
L1	208	284	219	279	218	314	179	189	172	170	192	229
R1	224	343	227	348	207	384	188	197	189	193	185	220
L2	198	293	204	314	199	300	188	238	181	226	181	245
R2	188	356	204	352	178	355	187	228	175	202	177	242
L3	176	338	173	367	173	348	180	249	182	231	183	244
R3	176	385	182	315	182	407	204	225	189	210	171	224
L4	183	286	187	445	180	361	184	205	185	194	175	190
R4	190	339	188	416	176	384	175	242	167	231	163	226
R5	188	374	190	276	216	427	175	193	180	190	172	187
průměr	192	333	197	346	192	365	184	219	180	205	178	223
Případ Figur.	Semizaplavovací											
	C01	C02	C03	C04	C05	C06						
L1	193	420	228	374	221	363						
R1	205	371	203	451	197	429						
L2	88	474	216	480	195	502						
R2	168	552	194	500	185	516						
L3	176	476	182	408	169	455						
R3	170	334	189	406	162	497						
L4	168	505	157	559	157	534						
R4	163	549	165	559	99	554						
R5	185	611	153	564	177	579						
průměr	169	477	187	478	174	492						

Legenda : číselné hodnoty v tabulce jsou rovny indexu stáří vzduchu [s] ve výšce hlavy 110 cm na podlahou

12 ZÁVĚRY

Cílem předložené práce byla optimalizace mikroklimatu v kabinách malých dopravních letadel. Hlavní pozornost tedy byla zaměřena na konstrukce systémů umožňujících úpravu mikroklimatu či ovlivňujících mikroklima a tepelnou pohodu v kabinách.

V první části byla popsána problematika tepelné pohody prostředí, větrání vnitřních uzavřených prostorů a možností predikce tepelné pohody prostřednictvím počítačových simulací. Byly vysvětleny pojmy mikroklima, tepelná pohoda prostředí, ekvivalentní teplota, diagram komfortních zón a další. Následně byly popsány hlavní škodliviny vznikající v prostoru kabiny a požadavky předpisů ohledně koncentrací těchto látek v kabině. Závěr první části byl věnován způsobům distribuce větracího vzduchu do kabiny letadla a také stručnému popisu hlavních prvků distribučních systémů (vzduchovody, koncové prvky atd.).

V druhé části byla podrobněji popsána kabina letadla EV-55, která byla předlohou pro vytvoření experimentální makety v měřítku 1:1, a na které byla realizována měření pro ověření CFD modelu větrání kabiny. Cílem měření a validačních CFD simulací bylo získat kalibrovaný a ověřený model s "naladěnou" metodikou postupu výpočtu, který by posléze umožnil experimentální vyšetřování různých úprav a variací větracích systémů pouze pomocí simulací, tzv. metodou in silico. Porovnání výsledků měření a validačních simulací odhalilo relativně dobrou shodu výsledků v hlavních částech kabiny, nicméně také naznačilo limity jednotlivých metod. U měření proudových polí to bylo zejména měření nízkých rychlostí proudění vzduchu, které se opakovaně vyskytují v některých částech kabiny. V částech kabiny, kde při vytváření proudového pole dominovaly primární proudy (např. řada 1, 4 a 5), byla shoda měření a simulací dobrá. V částech kde rychlost proudění klesala pod hodnotu 10 cm/s, se však projevil vyšší rozdíl. Lze ovšem jen těžko určit, která metodika je přesnější, neboť hodnoty získané z měření jsou již zatíženy příliš velkou nejistotou měření a naopak v simulaci se začíná více projevovat vliv sítě výpočtových buněk a zvoleného diferenčního schématu. V případě teplotních polí byla shoda velmi dobrá a ve všech modelových případech byly výsledky měření ve shodě s výsledky simulací. Na druhou stranu je třeba podotknout, že validace byla provedena jen pro mírně neizotermní případy, neboť z důvodů popsaných v kapitole 9.2 nebylo možné měřit režimy vytápění či chlazení. Z grafů Přílohy I pro teploty je také patrné, že se v kabině vyskytuje výšková teplotní stratifikace, která však není simulací zcela korektně zachycena.

Následně byla práce věnována samotné optimalizaci prostředí v kabině letadla. Autorem byly zvoleny pro optimalizaci jen takové okruhy technických přístupů a opatření, které jsou realizovatelné s ohledem na technická, ekonomická a bezpečnostní omezení vyplývající ze zaměření práce na kabiny malých dopravních letadel. Byly to Optimalizace typu distribuce větracího vzduchu (skupina OPT1), Optimalizace geometrie distribučních vzduchovodů (OPT2), Optimalizace tloušťky tepelné izolace (OPT3) a Optimalizace emisivity vnitřních povrchů (OPT4). Postupem popsaným v kapitole 11.1 bylo vytvořeno celkem 50 modelových případů, na jejichž základě bylo vytvořeno 50 sad okrajových podmínek a simulací. Hlavním cílem bylo najít takovou kombinaci technických řešení a opatření, která by v kabině letadla zajistila optimální mikroklima, větrání a tepelnou pohodu pro cestující. Nejprve byl práce zaměřena ve skupině OPT1 na posouzení chování jednotlivých typů

distribuce vzduchu do prostoru kabiny při různých okolních podmínkách. Byl testován klasický Směšovací systém, Modifikovaný směšovací systém a systém, který je autorem nazýván Semizaplavovací, neboť pro distribuci vzduchu využívá velkoplošné výstky konstrukčně vycházející z principu výstek pro zaplavovací větrání. Na základě výsledků ze skupiny OPT1 byly poté definovány modelové případy pro skupinu OPT2, jejímž cílem bylo prozkoumat vliv tvaru distribučních vzduchovodů na výsledné proudové pole v kabině a tím i na mikroklima a tepelnou pohodu. Protože byl jako nejperspektivnější větrací systém ve skupině OPT1 identifikován Modifikovaný směšovací systém, byla většina modelových případů ve skupině OPT2 zaměřena právě na toto technické řešení. Byl zkoumán nejenom vliv umístění přívodu ve tvaru T do hlavních vzduchovodů, ale i pozice a geometrie horních výstek. Byly provedeny také simulace s jiným typem připojení a to sice s přímým předním a přímým zadním.

Na základě výsledků skupiny OPT2 lze konstatovat, že optimální prostředí vytváří Modifikovaný směšovací systém s párovými výstky původní geometrie (viz kapitola 11.4).

Dalším důležitým prvkem konstrukce kabiny je síla tepelné izolace ve stěnách, stropu a podlaze kabiny. Tepelná izolace má nejen vliv na tepelnou pohodu cestujících v kabině, ale i na celkovou tepelnou ztrátu kabiny a tím i na množství energie nezbytné pro vytápění/chlazení kabiny. V práci byly vyšetřovány tři sestavy tloušťek tepelné izolace a to minimální, střední a vysoká (viz. tabulky v kapitole 11.5). Výsledky ze skupiny OPT1 mimo jiné ukázaly, že hlavním problémem u Semizaplavovacího větrání je zajištění tepelné pohody a dobrého provětrání kabiny při extrémních okolních teplotách. V případě vytápění vzduch s vyšší teplotou, než je teplota vzduchu v kabině, rychle stoupá ke stropu kabiny, prostor v blízkosti podlahy tak není dostatečně vytápěn a vlivem tepelných ztrát u podlahy klesá povrchová teplota k nízkým hodnotám, což následně vede k negativnímu tepelnému pocitu pro dolní končetiny a chodidla. Na základě těchto zjištění byly proto vytvořeny speciální modelové případy OPT3-C07 a OPT3-C08, které se vyznačovaly zesílenou tepelnou izolací podlahy. Stručně lze výsledky simulací v optimalizační skupině OPT3 shrnout do konstatování, že shodně s výsledky skupiny OPT2 prokázaly vyrovnanou výkonnost systému Modifikovaného směšovacího větrání pro různé tloušťky tepelné izolace a potvrdily silnou závislost kvality větrání u Semizaplavovacího větrání na okolní teplotě. Semizaplavovací větrání poskytuje při vytápěcím režimu dostatečné větrání v úrovni hlavy, ale podává velice špatné výsledky při intenzivním chlazení, kdy se větrací vzduch v důsledku stabilní teplotní stratifikace hromadí u podlahy a není distribuován do dýchacích zón jednotlivých cestujících. Tento hendikep prakticky vylučuje využití tohoto typu větrání pro kabiny malých dopravních letadel, protože chladicí režim je běžným provozním režimem při pozemním provozu letadla v letních měsících.

Posledním typem optimalizace bylo prozkoumání vlivu emisivity vnitřních povrchů na tepelnou pohodu cestujících. Byly zkoumány celkem tři hodnoty emisivity: 0,2; 0,6 a 0,9. Zvolené hodnoty emisivity byly aplikovány pouze na vnitřní povrchy, u nichž je možná případná povrchová úprava pro dosažení dané emisivity. Jednalo se o strop, stěnové panely a přepážky. Upravené emisivity byly zkoumány v kombinaci s vysokým a minimálním zateplením, neboť vliv emisivity se může projevit právě při extrémních podmínkách, kdy je vlivem většího rozdílu povrchových teplot intenzifikován přenos tepla radiací z povrchu

lidského těla. Z výsledků modelových případů v optimalizační skupině OPT4 lze vyvodit závěr, že emisivita vnitřních povrchů má jen velice malý dopad na výslednou tepelnou pohodu v kabině. Ať už je emisivita povrchů nízká, nebo vysoká, na základě principu přenosu tepla radiací a celkové tepelné bilance povrchů dochází při snižování emisivity vnitřních povrchů jen k malým změnám směrem k vyšší tepelné pohodě. Navíc s ohledem na technické a materiálové řešení případných úprav vnitřních povrchů je reálné spíše vytváření materiálů s nízkými emisivitami než materiálů se střední emisivitou. Takové úpravy jsou však problematické z hlediska designu, neboť se většinou jedná o kovové materiály, což posléze vede ke kovovému odlesku takových povrchů. Závěrem z výsledků skupiny OPT4 je tedy konstatování - změnou emisivity vnitřních povrchů lze jen obtížně dosáhnout zlepšení tepelné pohody v kabině letadla.

Závěrem lze shrnout výsledky optimalizace prostředí v uzavřených kabinách malých dopravních letadel do následujících doporučení a poznatků.

- V malém prostoru je potřeba velice důsledně a obezřetně volit typ distribuce větracího vzduchu do prostoru kabiny. Nejlepší celkové mikroklima vytvářel Modifikovaný směšovací větrací systém využívající párových výustek, které přivádí vzduch k nohám a ke stěně u každého cestujícího.
- Typ připojení a umístění přívodu větracího vzduchu do hlavních distribučních vzduchovodů má zásadní vliv na směřování primárních proudů a celkovou kvalitu větrání v kabině. Jako nejméně závislý systém byl identifikován Modifikovaný směšovací větrací systém, především díky vyššímu počtu distribučních výustek a vzhledem k faktu, že vzduch je distribuován směrem k podlaze i stropu kabiny.
- Zvláště důležité je dbát na dostatečnou tepelnou izolaci stěn, stropu a podlahy kabiny. Tloušťka izolace má zásadní vliv nejen na tepelnou pohodu, ale i na spotřebu energie na vytápění/chlazení kabiny, potažmo na spotřebu paliva a ekonomiku provozu letadla.
- Emisivita vnitřních povrchů může ovlivnit přenos tepla radiací z povrchu člověka, ovšem vzhledem ke změněným poměrům přenosu tepla radiací mezi ostatními povrchy kabiny je přínos takového opatření ke zvýšení tepelné pohody sporný a nelze jej doporučit jako účinné opatření.

Jako optimální systém pro větrání a klimatizaci obdobných kabin malých dopravních letadel lze na základě získaných výsledků a závěrů doporučit Modifikované směšovací větrání s geometrií uvedenou v kapitole 11.3.2. V kombinaci s vysokým zateplením stěn a vysokou emisivitou interiéru pak tento způsob větrání zajišťuje nejvyšší tepelnou pohodu pro zkoumaný rozsah okolních a provozních podmínek. Systém bude také v rámci probíhajících projektů na podzim roku 2011 realizován v maketě kabiny a budou provedena měření pro ověření funkčnosti systému v laboratorních podmínkách. Výsledky a znalosti získané v průběhu disertační práce tak budou dále sloužit pro následný rozvoj v oblasti problematiky optimalizace mikroklimatu v kabinách dopravních prostředků na pracovišti autora.

13 SUMMARY

The aim of thesis was to optimize the microclimate in cabin of small transport aircraft. The main focus was related to design of systems which allow control the cabin environment and thermal comfort in the cabin. The basis for the work was the literature research, which identified the main criteria for evaluation of the cabin environment and areas of technical approaches which can improve the quality of ventilation and thermal comfort.

In the second part the 1:1 scale mock-up of the cabin was described and inside mock-up measurements of cabin environments were carried out. The aim of measurements and validation simulations was to obtain calibrated and validated model with a "tuned" methodology of simulation procedure, which would then allow the experimental investigation of various modifications and variations of ventilation systems using only simulations, the in silico method. The comparison of measurements results and validation simulations revealed relatively good agreement of results in major parts of the passengers cabin, but also indicated the limits of each method. Most problematic were measurements of low air velocities and accuracy of its CFD predictions. The prediction of temperature fields was in very good agreement with measurements for all cases. However, it is necessary to take into account that only slightly no isothermal cases were measured and the vertical temperature stratification in the model was not practically observed.

For optimization were chosen only those areas of technical approaches that are feasible with regard to technical, economic and safety constraints imposed from focus of work on small transport aircraft cabins. Groups of optimization were: Optimization of the type of distribution of ventilation air (group OPT1), Optimization of the geometry of distribution air ducts (OPT2), Optimization of insulation thickness (OPT3) and Optimization of emissivity of internal surfaces (OPT4). The main objective was to find a combination of technical solutions and approaches, which could provide optimal cabin environment, quality of ventilation and thermal comfort for passengers.

On the basis of results and conclusions, the optimal system for ventilation and air conditioning of similar small transport aircraft cabins could be recommend Mixing ventilation with special type of air ducts geometry, described in chapter 11.3.2. In combination with high thermal insulation of walls and high emissivity of the interior, the ventilation system ensures maximum thermal comfort under investigated range of environmental and operation conditions. The system will also be implemented in the cabin mock up and measurements will be performed at the autumn 2011 to verify the functionality of the system under laboratory conditions. Results and knowledge gained during the thesis will be used for the next development of problems of optimizing microclimate in cabins of transport vehicles on the institute of the author.

14 LITERATURA A ZDROJE INFORMACÍ

AMA Medical guidelines for airline travel - 2nd Edition [Kniha]. - Alexandria : Aerospace Medical Association, 2003.

ANSI/ASHRAE Standard 161/2007 - Air Quality within Commercial Aircraft. - Atlanta : ASHRAE, 2007.

ANSI/ASHRAE Standard 62 - Ventilation for Acceptable Indoor Air Quality. - Atlanta : ANSI/ASHRAE, 1989.

ASHRAE AHSRAE handbook - Fundamentals [Kniha]. - Atlanta : ASHRAE, 2001.

BYSTRICKÁ A. a JANOTKOVÁ E. Měření teplotních a rychlostních polí za velkoplošnou vyústkou [Konference] // XXVI. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky - Herbertov. - Praha : Grandient, 2007. - Sv. XXVI.

BYSTRICKÁ A. a JANOTKOVÁ E. Návrh zařízení pro výzkum zaplavovacího větrání [Konference] // Setkání kateder hydromechaniky a termomechaniky 2005. - Blansko : Vysoké učení technické v Brně, 2005. - Sv. 24.

DE GIDS W. Quality of the environment in commercial aircraft – CabinAir [Časopis] // Air Infomation Review. - [místo neznámé] : AIVC, 2003. - 2 : Sv. 24.

DECHOW M. Concentration of selected contaminants in cabin air of Airbus aircrafts [Časopis] // Chemosphere. - [místo neznámé] : PERGAMON, 1997. - 1-2 : Sv. 35.

DOT Study of possible effects on health of aircraft cabin environments [Kniha]. - London, UK : Institute for Environment and Health, Department of transport, 2001.

DOUGLAS C. Cabin air comfort [Časopis] // FAST. - [místo neznámé] : Airbus, 1996. - Sv. 19.

Evektor EV-55 Outback [Online] // evektor.cz. - 1. 1 2011. - 24. 7 2011. - <http://www.evektor.cz/outback/technicka-specifikace.aspx>.

Evektor Interní materiály firmy Evektor s.r.o. // - publikováno se svolením firmy. - 2005.

FANGER P. O. [a další] Air turbulence and sensation of draught [Časopis] // Energy and Buildings. - 1988. - 2 : Sv. 12.

HEJČÍK J. VYSOCE ÚČINNÝ REKUPERÁTOR SPALIN [Kniha]. - Brno : Vysoké učení technické v Brně, 2009. - Sv. Disertační práce.

HOCKING M. B. Passenger aircraft cabin air quality: trends, effects, social costs, proposal [Časopis] // Chemosphere. - [místo neznámé] : PERGAMON, 2000. - 4 : Sv. 41.

HUNT E. H. a SPACE D. R The Airplane Cabin Environment [Konference] // International In-flight Service Management Organization Conference. - Montreal : [autor neznámý], 1994.

HUNT E. H., REID D. H. a SPACE D. R. Commercial Airliner Environmental Control System [Konference] // Aerospace Medical Association annual meeting. - Anaheim - California : [autor neznámý], 1995.

HUO Y. [a další] A Systematic Approach to Describe the Air Terminal Device in CFD Simulation For Room Air Distribution Analysis [Časopis] // Building and Environment. - [místo neznámé] : Elsevir, 2000. - 6 : Sv. 35.

CHÝSKÝ J. a HEMZAL K. a kol. Větrání a klimatizace [Kniha]. - Brno : Bolit, 1993.

InterInfomarics Airbus Case Study [Online] // iiprg.cz. - 2009. - 15. 7 2011. - <http://www.iiprg.cz/hello?sect=18&pagelId=198>.

ISO 14505 ČSN EN Ergonomie tepelného prostředí - Honocení tepelného prostředí ve vozidlech [Kniha]. - Praha : Český normalizační isntitut, 2007.

ISO 7730 ISO Standard Moderate thermal environments - determination of PMV and PPD indices and specification of the conditions for thermal comfort [Kniha]. - Geneva : International Standards Organization, 2006.

JANOTKOVÁ E. Technika prostředí [Kniha]. - Brno : Skripta VUT Brno, 1991.

JAROŠ M. a KATOLICKÝ J. Komplexní CFD simulace solárně ohřívaného prostoru [Konference] // Sborník 2. národní konference IBPSA-CZ "Simulace budov a techniky prostředí". - Praha : ČVUT, 2002. - Sv. II.

JIANG Z., CHEN Q. a MOSER A. Comparison of Displacement and Mixing Diffusers [Časopis] // Indoor Air. - 1992. - stránky 168-179.

JOHNSON D. Ventilation in VH-EBQ QANTAS Boeing 747 [Online] // flickr.com. - 6. 5 2010. - 2. 8 2011. - <http://www.flickr.com/photos/gunzel412/4931113918/lightbox/#/photos/gunzel4>.

KAMELL R. a KHALIL E. E. Investigation of the Airborn Contaminant Age in Surgical Operating Theatres [Konference] // The 7th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control. - Sapporo - Japan : [autor neznámý], 2003.

KOK J. C., VAN MUIJDEN J. a SPEKREIJSE S.P. Enhancement of Aircraft Cabin Comfort Studies by Coupling of Human Thermoregulation With Radiation and Turbulent Convection [Konference] // EUROMECH Colloquium 471. - Göttingen - Germany : DLR, 2005.

KOŠNER J. Počítačový měřicí systém v laboratoři větrání [Online] // Laboratoř větrání - Vysoké učení technické v Brně. - Vysoké učení technické v Brně - Energetický ústav, 10. 1 2002. - 20. 6 2011. - <http://ottp.fme.vutbr.cz/laboratore/vetrani/>.

KUZNIK F. a BARAU J. Numerical and Experimental Investigation of a Mechanically Ventilated Room - the Impact of Inlet Boundary Conditions on CFD Modelling of Ventilation

Systems [Časopis] // The International Journal of Ventilation. - Coventry : Veetech Ltd., September 2005. - 2 : Sv. 4.

LAJČÍKOVÁ A. Ochranná filtrace [Časopis] // Větrání, vytápění, instalace. - Praha : [autor neznámý], 2003. - Sv. 2.

LI X. a JIANG Y. Calculation of Age-of-air with Velocity Field [Konference] // Post-IAQ 96 Seminary. - Beijing - China : [autor neznámý], 1996.

MADSEN T. L., OLESEN B. W. a KRISTENSEN N. K. Comparison between operative and equivalent temperature under typical indoor conditions [Časopis] // ASHRAE Transactions V.90, Part 1. - 1984. - stránky 1077-1090.

MALALASEKERA W. a VERSTEEG H. K. Computational fluid dynamics [Kniha]. - Harlow : Person Education Limited, 2007. - Sv. I.

MARTINÍK K. Termoregulace [Online] // profmartinik.cz. - 2011-01-31. - 5. 4 2011. - www.profmartinik.cz/wp-content/soubory/termoregulace.pdf.

MENTER F. R., Kuntz M. a LANGTRY R. Ten Years of Industrial Experience with the SST [Konference] // Turbulence, Heat and Mass Transfer. - New York : Begell House, Inc, 2003. - Sv. 4.

MÜLLER I. [a další] Prediction of Thermal Comfort and Ventilation Efficiency for Small and Large Enclosures by Combined Simulations [Konference] // EUROMECH Colloquium 471. - Göttingen, Germany : DLR, 2005.

MURAKAMI S. Developing the CFD technique from an analysis to design tool [Konference] // The 7th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control. - Sapporo, Japan : [autor neznámý], 2003.

NABBOUH Y. J. The Effectiveness of a Commercial Aircraft HVAC System within the Passenger Cabin [Kniha]. - Hatfield : University of Hertfordshire, 2002. - Msc Thesis.

NĚMEČEK P. Nejistoty měření [Kniha]. - Praha : Česká společnost pro jakost, o.s., 2008.

NILSSON H. [a další] Definition and theoretical background of the equivalent temperature [Část knihy] // JTI-Rapport 270 - Assessment of thermal climate in operator's cabs. - Upsala : [autor neznámý], 2000.

NILSSON O. H. Comfort climate evaluation with thermal manikin methods and computer simulation models [Kniha]. - Gävle : University of Gävle, 2004. - Doctor thesis.

PALEŇČÁR R., VDOLEČEK F. a HALAJ M. Nejistoty v měření I: vyjadřování [Článek] // Automa. - Brno : [autor neznámý], 2001. - 7-8. - stránky 50-54.

PALEŇČÁR R., VDOLEČEK F. a HALAJ M. Nejistoty v měření II: nejistoty [Článek] // Automa. - Brno : [autor neznámý], 2001. - 10. - stránky 52-56.

- PALENČÁR R., VDOLEČEK F. a HALAJ M.** Nejistoty v měření III: nejistoty [Článek] // Automat. - Brno : [autor neznámý], 2001. - 12. - stránky 28-33.
- PATANKAR S. V.** Numerical heat transfer and fluid flow [Kniha]. - [místo neznámé] : Hemisphere Publishing Corporation, 1980.
- PENNECOT J. [a další]** Numerical Simulations of Mixed Turbulent Convection in a Generic Aircraft Cabin [Konference] // EUROMECH Colloquium 471. - Göttingen, Germany : DLR, 2005.
- PIERCE W. M., JANCZEWSKI J. N. a ROETHLISBERGER B.** Air Quality on Commercial Aircraft [Časopis] // ASHRAE Journal. - Atlanta, USA : [autor neznámý], 1999. - 9 : Sv. 41.
- POKORNÝ J.** Vývoj nástroje pro predikci tepelného komfortu v kabině automobilu [Kniha]. - Brno : Vysoké učení technické v Brně, FSI, 2011. - Sv. Pojednání k státní doktorské zkoušce.
- SKISTAD H. [a další]** Displacement ventilation [Kniha]. - Trondheim : Rehva gidebook, 2002.
- SKOVGAARD M. a NIELSEN P. V.** Modelling Complex Inlet Geometries in CFD – Applied to Air Flow in Ventilated Rooms [Konference] // 12th AIVC conference. - Ottawa, Canada : AIVC, 1991.
- SPACE D. R., WATERS K. L. a WILLES D. L.** Chapter 9 - Aircrafts [Část knihy] // HVAC applications. - Atlanta, USA : ASHRAE, 1999.
- ŠPONIAR D. a BARTÁK M.** Honocení tepelné pohody z výsledků CFD simulace a jejich aplikace v interiéru vozidla [Článek] // Větrání, vytápění, inatsalce. - Praha : Společnost pro techniku prostředí, 2007. - 3. - stránky 151-154.
- VAN BUGGENHOUT S., ZERIHUN DESTA T. a VAN BRECHT A.** Data-based mechanistic modelling approach to determine the age of air in ventilated space [Časopis] // Building and Environment. - Brno : Elsevier, 2006. - Sv. 41. - stránky 557-567.
- Vitalition** Omrzliny: příznaky, léčba [Online] // Vitalion.cz. - 2011. - 7. 3 2011. - <http://nemoci.vitalion.cz/omrzliny/>.
- WONG K. L. a ERICSON S. C.** CFD Validation For Contaminant Transport in Aircraft Cabin Ventilation Flow Fields [Konference] // Ventilation 2003 - The 7th International Symposium on Ventilation for Contaminant Control. - Sapporo, Japan : [autor neznámý], 2003.
- WOOLS Daniel** Swine flu prompts EU warning on travel to USA [Online] // guardian.co.uk. - 28. 04 2009 . - 4. 5 2011. - <http://www.guardian.co.uk/world/feedarticle/8477508>.
- ZHANG T. a CHEN Q.** Novel air distribution system for commercial aircraft cabin [Časopis] // Building and environment. - [místo neznámé] : Elsevier, 2006.

15 VLASTNÍ PUBLIKAČNÍ ČINNOST

- [I] FIŠER, J.; JAROŠ, M. Simulace solárních zisků v dvojité energetické fasádě. In *Simulace budov a techniky prostředí 2004*. Praha, Společnost pro techniku prostředí. 2004. p. 13 - 18. ISBN 80-02-01678-5.
podíl: 50%
- [II] JAROŠ, M.; FIŠER, J. Simulace solárních zisků v dvojité energetické fasádě. *Vytápění, větrání, instalace*. 2005. 14(3). p. 131 - 134. ISSN 1210-1389.
podíl: 40%
- [III] FIŠER, J. Computer Simulation of Cabin Environment in the Evktor EV-55 Aircraft. *Letecký zpravodaj*. 2005. 2005(3). p. 9 - 10. ISSN 1211-877X.
podíl: 100%
- [IV] FIŠER, J.; JÍCHA, M. Počítačové modelování mikroklimatu v kabinách dopravních letadel. In *Fluid Mechanics and Thermomechanics*. Bratislava, Slovak University of Technology in Bratislava. 2006. p. 19 - 19. ISBN 80-227-2434-3.
podíl: 80%
- [V] FIŠER, J.; JÍCHA, M. CFD simulace výkonnostních extrémů klimatizačního systému v kabině letounu EV-55. In *Simulace budov a techniky prostředí 2006, Nezařazené články*. Praha, IBPSA-CZ. 2006. p. 129 - 134. ISBN 80-01-03577-8.
podíl: 50%
- [VI] FIŠER, J.; JÍCHA, M. CFD Simulation of Quality of Environment in Small Transport Airplanes Cabins. *Letecký zpravodaj*. 2006. 2006(3). p. 3 - 5. ISSN 1211-877X.
podíl: 50%
- [VII] OTÁHAL, J.; FIŠER, J.; KOŠNER, J.; JÍCHA, M. Influence of the PDA setup on a quality of velocity distributions. In *21st Symposium on Anemometry, Proceedings*. Praha, Ústav pro hydrodynamiku AV ČR, v. v. i. 2007. p. 127 - 130. ISBN 978-80-87117-01-9.
podíl: 20%
- [VIII] FIŠER, J.; JÍCHA, M. Simulace kvality větrání kabiny malého dopravního letounu. In *XXVI. Mezinárodní vědecká konference kateder a pracovišť mechaniky tekutin a termomechaniky - Sborník z konference*. Praha, Jiří Nožička - Grandient. 2007. p. 25 - 26. ISBN 80-86786-09-9.
podíl: 70%
- [IX] OTÁHAL, J.; JEDELSKÝ, J.; FIŠER, J.; JÍCHA, M. Efficiency of the pressure and effervescent atomization. In *Ilass Europe 2007*. Mugla, Turecko, Mugla University. 2007. p. 76 - 79.
podíl: 16%
- [X] OTÁHAL, J.; KOŠNER, J.; FIŠER, J.; JÍCHA, M. Influence of two-phase flow pattern in mixing chamber of effervescent atomizer on spray quality. In *Flucome 2007*. Tallahassee, Florida state university. 2007. p. 109 - 120.
podíl: 20%
- [XI] FIŠER, J.; OTÁHAL, J.; JÍCHA, M. Numerical Simulation of Cabin Environment in EV-55 Aircraft. In *Flucome 2007*. Tallahassee, Florida State University. 2007. p. 42 - 53.
podíl: 60%

- [XII] OTÁHAL, J.; FIŠER, J.; JÍCHA, M. Performance of Pressure and Effervescent Atomizers. In *Colloquium FLUID DYNAMICS 2007*. Praha, Institute of Thermomechanics AS ČR. 2007. p. 67 - 68. ISBN 978-80-87012-07-9.
podíl: 25%
- [XIII] OTÁHAL, J.; FIŠER, J.; JÍCHA, M. The influence of the PDA setup on resultant spray characteristics. In *Experimental fluid mechanics 2007 - Conference Proceedings*. Liberec, Technická University of Liberec. 2007. p. 93 - 97. ISBN 978-80-7372-273-9.
podíl: 25%
- [XIV] FIŠER, J.; JÍCHA, M.; VIŠČOR, P. Možnosti redukce spotřeby energie na klimatizaci kabin osobních automobilů. In *XXVII. setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*. 1. Plzeň, Západočeská univerzita v Plzni. 2008. p. 71 - 76. ISBN 978-80-7043-666-0.
podíl: 70%
- [XV] FIŠER, J.; MLČÁK, R.; PAVELEK, M.; JÍCHA, J. Measurements of Temperature Patterns in Ventilated Spaces by Novel Measurement Method. In *Conference Proceedings, International Conference Experimental Fluid Mechanics 2008*. sborník. Liberec, Technická Univerzita Liberec. 2008. p. 36 - 41. ISBN 978-80-7372-417-7.
podíl: 25%
- [XVI] FIŠER, J.; JÍCHA, M. Vliv způsobu modelování distribuce větracího vzduchu na výsledky CFD simulace vnitřního prostředí. *Strojárstvo/Strojírenství*. 2009. 2009(6). p. 51 - 52. ISSN 1335-2938.
podíl: 90%
- [XVII] POKORNÝ, J.; FIŠER, J. Používané modely lidského tepelného komfortu. *Strojárstvo/Strojírenství*. 2009. 2009(mimořádné). p. 209 - 210. ISSN 1335-2938.
podíl: 25%
- [XVIII] POKORNÝ, J.; FIŠER, J.; JÍCHA, M. Predikce tepelné pohody v nehomogenních prostředích pomocí vícesegmentových modelů. In *XXIX. Setkání kateder mechaniky tekutin a termomechaniky*. Ostrava, Vysoká škola báňská Ostrava. 2010. p. 231 - 234. ISBN 978-80-248-2244-0.
podíl: 30%
- [XIX] POKORNÝ, J.; FIŠER, J.; JÍCHA, M. Predikce tepelné pohody dle Zhang s využitím Tanabeho modelu fyziologie člověka. In *Simulace budov a techniky prostředí. Sborník 6.konference IBPSA-CZ*. ČVUT. 2010. p. 7 - 197. ISBN 978-80-254-8661-0.
podíl: 25%
- [XX] FIŠER, J.; POKORNÝ, J.; JÍCHA, M. Prediction of car cabin environment by means of 1D and 3D cabin model. In *Experimental Fluid Mechanics 2010 - Conference Proceedings*. 2010. Liberec, Technická university of Liberec. 2010. p. 145 - 150. ISBN 978-80-7372-670-6.
podíl: 80%
- [XXI] FIŠER, J.; POKORNÝ, J.; JÍCHA, M. 1D software tools for simulations of indoor cabin environment. *Transaction of the VŠB-Technical university of Ostrava, Mechanical series*. 2011. 2010(3). p. 61 - 67. ISSN 1210-0471.
podíl: 80%

- [XXII] FORMAN, M.; FIŠER, J.; BOWMAN, R.; JÍCHA, M. Numerical study of personalised ventilation inlets in the aircraft suite. In Indoor Air 2011, 2011. Austin - Texas - USA, International Society of Indoor Air Quality
podíl: 40%

16 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

A_i	[různé]	koeficient citlivosti pro určení nejistoty nepřímého měření
c_p	[J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹]	měrná tepelná kapacita plynu za konstantního tlaku
C_B	[kg·m ⁻³]	koncentrace plynu v konkrétním bodě prostoru
e	[-]	index efektivity větrání
f_{cl}	[-]	faktor zvětšení povrchu lidského těla odevěm
$h_{virtual}$	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel přenosu tepla konvekcí a radiací z povrchu figuríny
k	[g·m ⁻³]	okamžitá hodnota koncentrace škodliviny
k_p	[g·m ⁻³]	koncentrace škodliviny v přiváděném vzduchu
k_I	[g·m ⁻³]	počáteční koncentrace škodliviny
k_r	[-]	koeficient rozšíření
k_{uA}	[-]	koeficient rozšíření nejistoty typu A
k_2	[g·m ⁻³]	konečná koncentrace škodliviny
L	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok odváděný okolním prostředím
\dot{m}_p	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní tok větracího vzduchu
M	[W·m ⁻²]	metabolický měrný tepelný tok
n	[-]	počet měření
p_a	[Pa]	parciální tlak vodní páry v okolním vzduchu
p_s''	[Pa]	parciální tlak vodní páry v nasyceném vzduchu při teplotě T_s
\dot{q}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok
\dot{q}_{real}	[W·m ⁻²]	měrný tepelný tok při aktuálních parametrech prostředí
$\dot{q}_{virtual}$	[W·m ⁻²]	Měrný tepelný tok získaný při virtuální kalibraci
\dot{Q}	[W]	tepelná produkce člověka
\dot{Q}_d	[W]	tepelný tok přenášený dýcháním
\dot{Q}_k	[W]	tepelný tok přenášený konvekcí
\dot{Q}_r	[W]	tepelný tok přenášený radiací
\dot{Q}_v	[W]	tepelný tok přenášený vypařováním
\dot{Q}_{ved}	[W]	tepelný tok přenášený vedením
\dot{Q}_z	[W]	tepelný tok (tepelné ztráty/zisky)
R_{cl}	[m ² ·K·W ⁻¹]	tepelný odpor oděvu
S	[g·s ⁻¹]	vydatnost zdroje škodliviny
S_y	[různé]	směrodatná odchylka
t	[s]	čas
t_B	[s]	Index stáří vzduchu

t_N	[s]	doba celkové výměny vzduchu ve větraném prostoru
T_l	[°C]	teplota přiváděného vzduchu
T_2	[°C]	teplota odváděného vzduchu
T_a	[°C]	teplota vzduchu
T_{cl}	[°C]	teplota povrchu oděvu
T_{eq}	[°C]	ekvivalentní teplota
T_o	[°C]	operativní teplota
\bar{T}_r	[°C]	střední radiační teplota
T_s	[°C]	teplota pokožky
T_u	[%]	intenzita turbulence
u_{Ay}	[různé]	nejistoty měření - typ A
u_{By}	[různé]	nejistoty měření - typ B
u_{Cy}	[různé]	základní celková nejistota měření
u_i	[různé]	nejistota měření i-té veličiny
u_y	[různé]	nejistota měření s více vlivy, nebo nepřímého měření
U	[různé]	rozšířená nejistota měření
U_{rel}	[různé]	celková relativní rozšířená nejistota měření
V	[m ³]	objem větraného prostoru
\dot{V}_p	[m ³ ·s ⁻¹]	objemový tok přiváděného vzduchu
w	[m·s ⁻¹]	rychlost proudění vzduchu
w_{ar}	[m·s ⁻¹]	relativní rychlost proudění vzduchu vůči člověku
w_i	[m·s ⁻¹]	flukтуаční rychlost vzduchu
\bar{w}	[m·s ⁻¹]	střední rychlost proudění vzduchu
W	[W·m ⁻²]	užitečný měrný mechanický výkon
y_i	[různé]	hodnota i-tého měření, měřené veličiny
\bar{y}	[různé]	aritmetický průměr měřené veličiny
z_{jmax}	[různé]	odhad odchylky od jmenovité hodnoty

Řecká abeceda

α_{cl}	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla konvekci na povrchu oděvu
α_R	[W·m ⁻² ·K ⁻¹]	součinitel přestupu tepla radiací
Γ	[m ² ·s ⁻¹]	difusní koeficient
φ	[%]	relativní vlhkost vzduchu
ρ	[kg·m ⁻³]	hustota plynu

Použité zkratky a označení

ASHRAE	American Society of Heating, Refrigeration and Air-Conditioning Engineers
CFD	Computational fluid dynamic - výpočtová mechanika tekutin
CCX	counter-current heat exchange - protiproudý přenos tepla
ECS	Environmental control system - systém pro kontrolu prostředí v kabině letadla
EV-55	Označení letadla firmy Evektor spol. s r. o.
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
OPT1	Optimalizační skupina 1 - optimalizace typu distribuce vzduchu
OPT2	Optimalizační skupina 2 - optimalizace geometrie distribučních vzduchovodů
OPT3	Optimalizační skupina 3 - optimalizace tloušťky tepelné izolace
OPT4	Optimalizační skupina 4 - optimalizace emisivity vnitřních povrchů
Q10	koenzym látkové výměny v buňkách
libra	Imperiální jednotka váhy - 0,454 kg
námořní míle	Imperiální délková jednotka - 1,825 km
m.n.m	Metrů nad mořskou hladinou (nadmořská výška)

17 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha I	Výsledky validačních simulací - případy A, B a C Porovnání výsledků měření a simulací
Příloha II	Výsledky validačních simulací případy A, B a C - řezy průměrovaných polí
Příloha III	Výsledky optimalizačních simulací (vzhledem k rozsahu pouze elektronicky na DVD) skupina OPT 1 - Optimalizace typu distribuce vzduchu
Příloha IV	Výsledky optimalizačních simulací (vzhledem k rozsahu pouze elektronicky na DVD) skupina OPT 2 - Optimalizace geometrie distribučních vzduchovodů
Příloha V	Výsledky optimalizačních simulací (vzhledem k rozsahu pouze elektronicky na DVD) skupina OPT 3 - Optimalizace tloušťky tepelné izolace
Příloha VI	Výsledky optimalizačních simulací (vzhledem k rozsahu pouze elektronicky na DVD) skupina OPT 4 - Optimalizace emisivity vnitřních povrchů
Příloha VII	DVD s elektronickou podobou práce a kompletních příloh